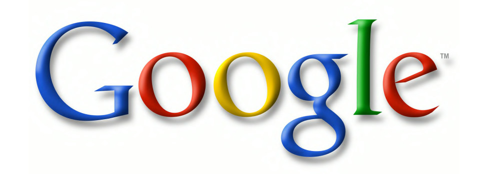
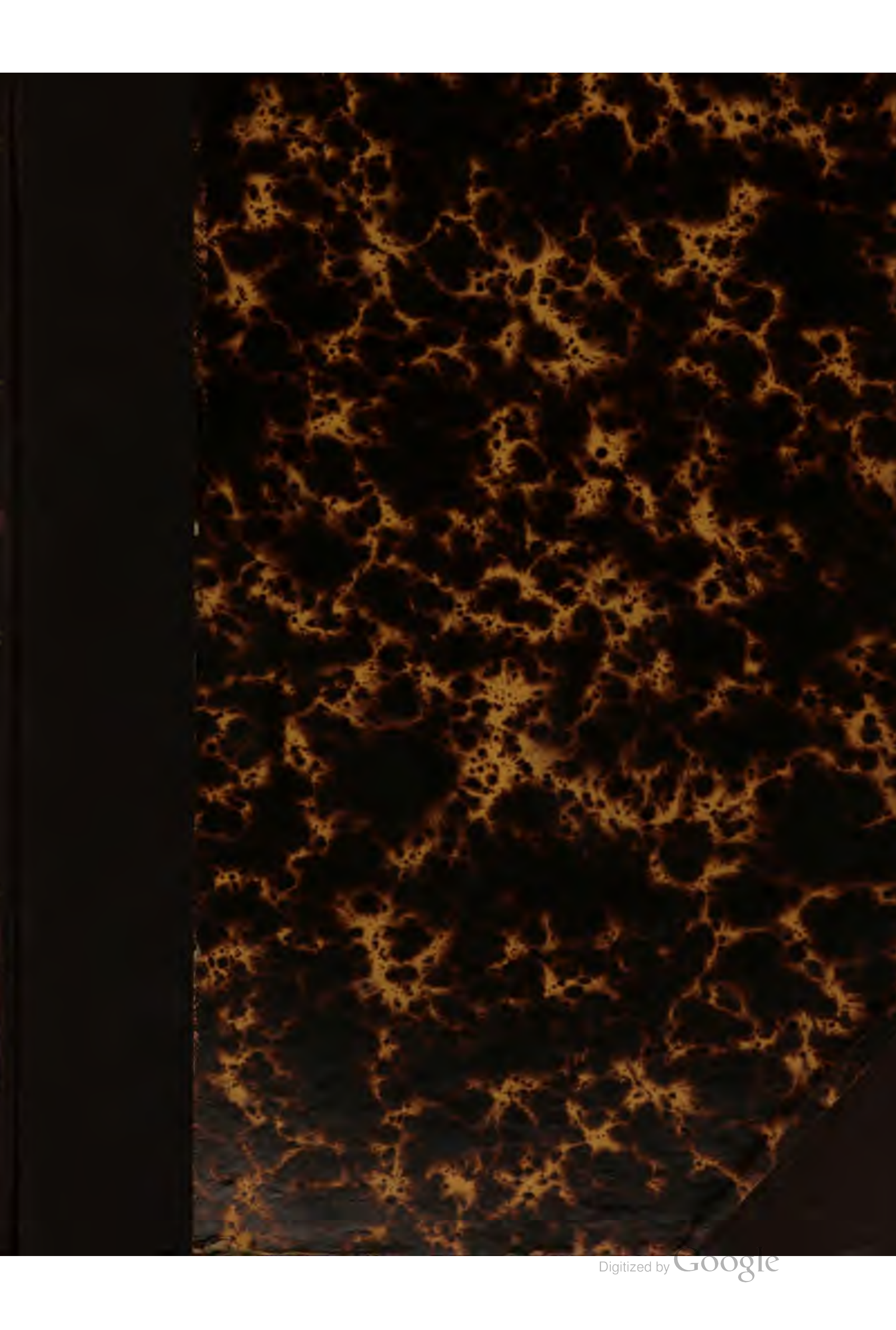
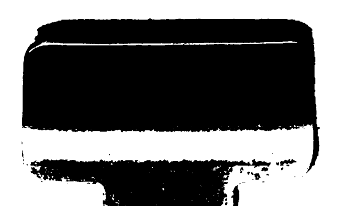






Encyklopädie

der

Elektrochemie.

Band II.

Die

Magnetische Untersuchung

des

Eisens und verwandter Metalle.

Ein Leitfaden für Hütteningenieure.

Von

Dr. Erich Schmidt.

Mit 42 in den Text gedruckten Abbildungen.



Halle a. S.
Druck und Verlag von Wilhelm Knapp.
1900.

Vorwort.

Von verschiedenen Seiten ist vielfach der Wunsch geäussert worden, einen Leitfaden zu besitzen, welcher den Hüttenleuten in kurzer und möglichst gemeinverständlicher Darstellung einen Ueberblick über den Gang und die Resultate der magnetischen Untersuchungen des Eisens und verwandter Metalle verschafft. Vor allem war es notwendig, eine Zusammenstellung derjenigen neueren magnetischen Eisenuntersuchungen zu erhalten, welche mit chemischen Analysen verbunden sind. Eine an mich ergangene Aufforderung, die vorhandene Lücke auszufüllen, gab Veranlassung zu der vorliegenden Arbeit.

Wenn auch auf diesem noch wenig erforschten, aber umfangreichen Gebiete ein abschliessendes Urteil bis jetzt keineswegs gewonnen ist, so liegen doch bereits manche für Hüttenleute wichtige Versuchsergebnisse vor, welche bei der Herstellung magnetischer Materialien und bei neuen Versuchen als Fingerzeig dienen können.

Es ist natürlich, dass die stetig sich mehrenden Forschungsresultate von Zeit zu Zeit eine Ergänzung und Verbesserung einer derartigen Zusammenstellung

erforderlich machen. Damit dies in möglichst erschöpfender Weise geschehen kann, wird es für mich von besonderem Werte sein, aus den beteiligten Kreisen Mitteilungen über neue Versuche zu erhalten. Auch werde ich für Verbesserungsvorschläge aus den hüttenmännischen Kreisen stets dankbar sein und bei einer etwa erforderlichen Neubearbeitung dieses Leitfadens alle geäusserten Wünsche nach Möglichkeit berücksichtigen.

Charlottenburg, im Juni 1899.

Dr. Erich Schmidt.

Inhaltsübersicht.



Einleitung.

Die von Jahr zu Jahr stetig fortschreitende Entwicklung des Dynamomaschinen-, Elektromotoren- und Transformatorenbaues zwingt alle beteiligten Kreise immer mehr und mehr, denjenigen Untersuchungen ihre Aufmerksamkeit zuzuwenden, welche für die Verbesserung der Leistungsfähigkeit dieser Maschinen von Wichtigkeit sind. Hierbei kommt in erster Linie die Untersuchung der magnetischen Eigenschaften des verwendeten Eisens in Betracht.

Schon seit einer Reihe von Jahren wurden in wissenschaftlichen Instituten und den Versuchslaboratorien elektrotechnischer Fabriken die für elektrische Maschinen bestimmten magnetischen Materialien verschiedener Herkunft untersucht; doch erst in neuester Zeit hat sich auch in hüttenmännischen Kreisen ein regeres Interesse hierfür kundgethan.

Die Bestrebungen der Hüttenwerke sind darauf gerichtet, einerseits das magnetische Verhalten der von ihnen hergestellten Eisensorten kennen zu lernen, anderseits durch Versuche festzustellen, auf welche Weise sich die magnetischen Eigenschaften des Eisens verbessern lassen. Da jedoch den leitenden Hütteningenieuren diese zum grössten Teil physikalischen Untersuchungen ferner liegen, und ihnen auch die meistenteils nur für Fachgelehrte bestimmte einschlägige Litteratur wenig bekannt ist, so stossen sie bei ihren Versuchen auf mancherlei Schwierigkeiten. Es dürfte daher für diese Kreise von Interesse sein, einen kurzen Ueberblick zu erhalten:

1. Ueber die gebräuchlichsten magnetischen Grundbegriffe;

2. über die wichtigsten magnetischen Untersuchungsmethoden;

3. über die bisher gewonnenen, für Hüttenleute wichtigen Ergebnisse solcher magnetischen Versuche, insbesondere derjenigen, welche sich mit den Beziehungen zwischen der chemischen Zusammensetzung, der mechanischen Behandlung und dem magnetischen Verhalten des Eisens beschäftigen.

Im folgenden soll versucht werden, das die Hüttenleute besonders Interessierende auf diesem Gebiete in gedrängter und möglichst gemeinverständlicher Uebersicht zusammenzustellen.

Da es wünschenswert ist, dass in den magnetischen Grundbegriffen, in den zu Grunde gelegten Einheiten und in der graphischen Darstellung der magnetischen Eigenschaften Einheitlichkeit herrscht, so sind im folgenden diejenigen Bezeichnungen gewählt worden, welche in den meisten neueren wissenschaftlichen Werken[1]) angewandt und auch bei den in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt angestellten magnetischen Untersuchungen benutzt werden. Auf andere besonders in der Technik noch übliche Bezeichnungen ist zum grössten Teil nur in Anmerkungen verwiesen. Als Grundeinheiten sind allgemein die Einheiten des absoluten elektromagnetischen C. G. S.-Systems benutzt worden.

---

1) Die beiden für magnetische Untersuchungen wichtigsten Werke, welche zum Teil auch im folgenden benutzt wurden, sind: J. A. Ewing, »Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen«. Deutsch von L. Holborn und St. Lindeck. 1892. Berlin-München, Julius Springer und R. Oldenbourg. — H. du Bois, »Magnetische Kreise, deren Theorie und Anwendung«. 1894. Berlin-München, Julius Springer und R. Oldenbourg.

I. Magnetische Grundbegriffe.

§ 1. Magnetische Kraftlinien.

In Fig. 1 sei *NS* ein kurzer Stabmagnet. Derselbe übt in allen Punkten des ihn umgebenden Raumes eine gewisse magnetische Kraft aus. Bestimmt man überall die Richtung dieser Kraft (z. B. durch eine kleine Magnetnadel, welche man an die verschiedenen Stellen des Raumes bringt) und zeichnet dann die Kurven, deren Tangenten in jedem Punkte die Richtung der dort wirksamen magnetischen Kraft darstellen, so erhält man die von Faraday eingeführten sogenannten *Kraftlinien*. Eine Anzahl dieser Kraftlinien ist in ihrem ungefähren Verlaufe in Fig. 1 durch die gestrichelten Linien dargestellt. Man kann die Anordnung der Kraftlinien in bekannter Weise am besten durch Eisenfeilicht veranschaulichen, welches auf ein auf den Stab gelegtes Papier gestreut wird (Fig. 2).

Gleichwie in der Umgebung des Stabes, so verlaufen auch im Innern desselben magnetische Kraftlinien. Ihr Verlauf ist in Fig. 1 durch die ausgezogenen Linien angedeutet. Diese innerhalb des Stabes verlaufenden Kraftlinien heissen auch *Magnetisierungslinien*. Verfolgt man die einzelnen Magnetisierungslinien und ihre Fortsetzung ausserhalb des Stabes als Kraftlinien, so findet man, dass jede Magnetisierungslinie mit der dazu gehörigen Kraftlinienfortsetzung eine geschlossene Kurve bildet.

§ 2. Magnetische Pole und magnetisches Moment.

Nach der älteren Darstellungsweise denkt man sich an den Enden des Stabes und in deren Nähe, wo

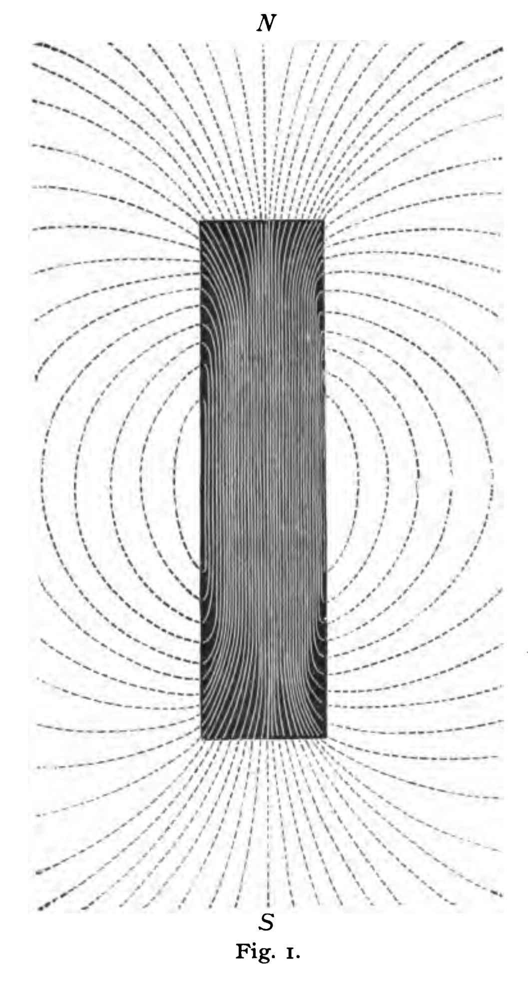


Fig. 1.

die Magnetisierungslinien in den umgebenden Raum austreten, eine hypothetische Masse, den *freien Magnetismus*, angehäuft und von hier aus in die Ferne wirkend.

Die Wirkung auf ferner liegende magnetische Punkte ist die gleiche, als ob die ganze Masse des freien Magnetismus in zwei Punkten in der Nähe der Enden des Stabes konzentriert wäre. Diese beiden Punkte nennt man die *Pole* des Magnetes. Der hier angehäuft gedachte freie Magnetismus ist an den beiden Polen der Masse nach gleich und nur durch das Vorzeichen unterschieden.

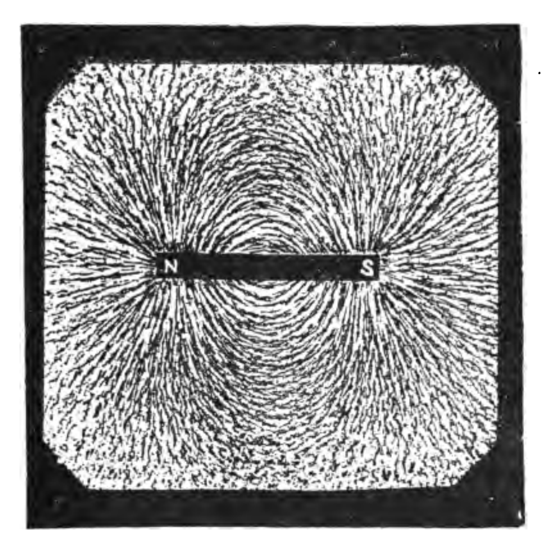


Fig. 2.

Dem positiven Vorzeichen entspricht der *Nordmagnetismus*, dem negativen Vorzeichen der *Südmagnetismus*. Der Pol, an welchem der Nordmagnetismus konzentriert gedacht ist, heisst der *Nordpol*, der andere Pol der *Südpol* des Magnetes. Der Nordpol eines um seine vertikale Achse drehbar befestigten Magnetes zeigt unter dem allein wirksamen Einfluss des erdmagnetischen Feldes stets nach Norden. Die Verbindungslinie der beiden Pole nennt man die *Achse* des Magnetes. Die Wirkung zweier Pole aufeinander ist immer derart, dass zwei

gleichnamige Pole sich abstossen, zwei ungleichnamige sich anziehen, und zwar mit einer Kraft, die dem Produkt der an den beiden Polen angehäuften Mengen des freien Magnetismus proportional und dem Quadrat ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist, entsprechend der Gleichung:

$$(1) \quad f = \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

in welcher f die magnetische Kraft, m_1 und m_2 die an den Polen angehäuften Mengen des freien Magnetismus und r den Abstand der beiden Pole voneinander bedeutet.

Die gesamte Masse des an einem Pol angehäuft gedachten freien Magnetismus nennt man die *Polstärke.* Die Einheit des freien Magnetismus ist hierbei diejenige Masse, welche auf eine ihr gleiche Masse in der Entfernung 1 mit der Einheit der Kraft wirkt. Dies wäre im elektromagnetischen C. G. S.-System diejenige Masse, welche auf die gleiche Masse in der Entfernung von 1 cm die Kraft von 1 Dyne ausübt.

Bildet man das Produkt aus der Polstärke und dem Abstande der beiden Pole eines Magnetes, so erhält man das *Moment* des Magnetes. Wenn m die Polstärke, l den Polabstand und M das magnetische Moment bedeutet, so hat man also die verbindende Gleichung:

$$(2) \quad M = ml.$$

§ 3. Magnetisches Feld.

Einen Raum, in welchem magnetische Kraftlinien verlaufen, nennt man ein *magnetisches Feld.* Das Feld heisst *gleichförmig,* wenn die magnetische Kraft an jeder Stelle den gleichen Wert und die gleiche Richtung hat. Man denkt sich dann die Kraftlinien als parallele, gleichgerichtete, gerade Linien, welche gleichen Abstand untereinander haben. Das magnetische Feld, welches vom

Erdmagnetismus herrührt, kann für einen kleinen Raum, z. B. ein Zimmer, als genügend gleichförmig betrachtet werden, falls nicht etwa durch Eisenmassen, welche sich in der Nähe befinden, oder durch elektrische Ströme die Gleichförmigkeit gestört wird.

Um die Stärke eines gleichförmigen magnetischen Feldes zu messen, kann man sich das Feld in eine gewisse Zahl von Kraftlinien zerlegt denken, welche desto dichter verlaufen, je stärker das Feld ist. Die Anzahl dieser idealen Kraftlinien, welche durch einen senkrecht zur Kraftlinienrichtung gelegten Querschnitt von der Grösse der Flächeneinheit hindurchtritt, ist ein Maass für die *Stärke des Feldes.* Diese Grösse [1]) wird mit $\mathfrak{H}$ [2]) bezeichnet.

§ 4. Magnetisches Feld einer Spule.

Ein magnetisches Feld kann auch erzeugt werden durch eine vom elektrischen Strom durchflossene Drahtspirale (Solenoïd). Wird eine solche Spirale gleichförmig gewickelt, d. h. derart, dass der Durchmesser jeder Windungslage und die Anzahl Windungen *(Windungszahl)* pro Längeneinheit auf ihrer ganzen Länge gleich ist, so erhält man im Innern dieser Spule in der Richtung ihrer Achse beim Hindurchschicken eines Stromes durch die Drahtwindungen ein angenähert gleichförmiges Feld, wenn die Spule eine genügende Länge hat. Die Stärke des Feldes an Punkten im Innern der

---

1) Sie heisst in der Technik auch *Felddichte* oder *specifische Intensität* des Feldes.

2) Es ist erwünscht, dass für die magnetischen Grössen (magnetisches Feld, magnetische Induktion und Magnetisierungsintensität) die von vielen bereits benutzten deutschen Buchstaben allgemein eingeführt werden. Nur die Horizontalintensität des erdmagnetischen Feldes wird im allgemeinen mit dem lateinischen Buchstaben H bezeichnet, was am besten auch beizubehalten ist.

Spule, welche genügend weit von den Enden entfernt sind, ergiebt sich aus der Gleichung:

(3) . . . . $\mathfrak{H} = \frac{4\pi n i}{L}$.

Hierbei bedeutet n die gesamte Anzahl der Windungen, L die Länge der Spule und i die Stromstärke (in C. G. S.-Einheiten)[1]).

§ 5. Magnetische Induktion.

Befindet sich in einem magnetischen Felde, z. B. dem Felde einer Spule, ein Eisenkörper, so wird derselbe magnetisiert. Hierbei erzeugen die positiv gerichteten Kraftlinien des Feldes an der Stelle ihres Eintritts in den Eisenkörper einen Südpol, an der Stelle ihres Austritts einen Nordpol. Verlaufen nun in dem Eisenkörper die Magnetisierungslinien gerade und parallel zu einander und haben gleichzeitig gleiche Richtung und gleichen Abstand voneinander, so nennt man die Magnetisierung eine gleichförmige. Dieser Fall tritt ein, wenn der Körper sich in einem gleichförmigen magnetischen Felde befindet und entweder ein Ellipsoïd oder ein unendlich langer Stab ist, deren beider Achsen in die Richtung der Kraftlinien fallen. Denkt man sich in diesem Falle einen idealen Schnitt senkrecht zur Richtung der Magnetisierungslinien durch den Körper gelegt, so nennt man die Gesamtzahl aller Kraftlinien, welche durch die Flächeneinheit dieses Schnittes hindurchtreten, die *magnetische Induktion* und bezeichnet sie mit $\mathfrak{B}$. Es ist also $\mathfrak{B}$ im elektromagne-

1) Wird i in Ampere ausgedrückt, so nennt man $\frac{ni}{L}$ die Anzahl *Amperewindungen* pro Centimeter. Man erhält dann für die Feldstärke $\mathfrak{H} = \frac{4\pi}{10}$ (= 1,257) mal Amperewindungen pro Centimeter, da 1 Ampere im C. G. S.-System = $\frac{1}{10}$ C. G. S.-Einheiten ist.

tischen C. G. S.-System die Gesamtzahl der Kraftlinien pro Quadratcentimeter des zu der Kraftlinienrichtung senkrechten Querschnitts eines gleichförmig magnetisierten Körpers. Man nennt $\mathfrak{B}$ auch die Anzahl *Induktionslinien pro Quadratcentimeter.* Die Anzahl Induktionslinien, welche auf den gesamten Querschnitt kommen, nennt man den *Induktionsfluss* und bezeichnet ihn im allgemeinen mit Φ. Es ist also

$$(4) \quad \mathfrak{B} = \frac{\Phi}{q},$$

wenn q der Querschnitt des betreffenden Körpers ist.

§ 6. Intensität der Magnetisierung oder specifischer Magnetismus.

Die Zahl der Induktionslinien pro Quadratcentimeter eines gleichförmig magnetisierten Körpers [1]) setzt sich zusammen aus der Anzahl Kraftlinien pro Quadratcentimeter, welche von dem äusseren magnetischen Felde herrühren und der Anzahl Magnetisierungslinien, welche in dem Eisen verlaufen [2]). Nennt man die letztere X, so hat man also die Beziehung:

$$(5) \quad \mathfrak{B} = \mathfrak{H} + X.$$

Die Grösse X erhält man aber leicht auf folgende Weise. Von einem Magnetpol von der Stärke m treten $4\pi m$ Kraftlinien [3]) in den umgebenden Raum aus. Diese

1) Man nennt dies auch in der Technik die *Gesamtdichte* der Induktionslinien.

2) Diese Grösse wird in der Technik auch *metallische Induktion* oder *Eisendichte* genannt.

3) Der Proportionalitätsfaktor 4π ist ein Einheitsfaktor, welcher bei der Benutzung des elektromagnetischen C. G. S.-Systems gewählt werden muss. Dies lässt sich etwa folgendermassen zeigen. Denkt man sich einen einzelnen Pol und um ihn eine Kugel mit dem Radius r konstruiert, durch deren Oberfläche $4\pi m$ Kraftlinien, welche vom Pol ausgehen, gleichmässig verteilt hindurchtreten, so beträgt die Anzahl Kraftlinien

sind natürlich auch in dem Eisen als Magnetisierungslinien vorhanden. Nimmt man an, dass sie dort gleichmässig verteilt sind, d. h. dass die Magnetisierung gleichförmig ist, so laufen, wenn q den Querschnitt des Eisenkörpers bedeutet, durch die Flächeneinheit des Querschnitts $4\pi\frac{m}{q}$ Magnetisierungslinien. Wenn man in diesem Ausdruck Nenner und Zähler mit dem Polabstand l multipliziert, so erhält man:

$$4\pi\frac{ml}{ql},$$

oder nach Gleichung (2) (Seite 6):

$$4\pi\frac{M}{ql}.$$

Wie wir wissen, ist eine gleichförmige Magnetisierung entweder bei einem Ellipsoïde oder einem unendlich langen Stabe zu erreichen, welche sich in einem gleichförmigen magnetischen Felde befinden. Betrachten wir von den Ellipsoïden nur das praktisch in Betracht kommende Rotationsellipsoïd, so ist dessen Polabstand $l=\frac{2}{3}$ seiner Länge[1]. Wenn wir diese mit $2a$ bezeichnen, so wird der Nenner in dem vorigen Ausdruck $\frac{4}{3}aq$. Dies ist das Volumen v des Rotationsellipsoïds. Nimmt man anderseits einen unendlich

---

pro Flächeneinheit $\frac{4\pi m}{4\pi r^2}$, da $4\pi r^2$ die Oberfläche einer Kugel mit dem Radius r ist. Dieser Bruch ist $=\frac{m}{r^2}$. Dieselbe Grösse hat aber auch im elektromagnetischen C. G. S.-System die Kraft, welche vom Pol auf ein magnetisches Teilchen im Abstande r wirkt. Soll also diese Beziehung bestehen, so muss die Anzahl der vom Pol ausgehenden Kraftlinien $=4\pi m$ sein.

1) Den experimentellen Beweis hierfür hat vor kurzem Herr Holborn geführt. Vergl. Sitzungsber. der Akad. d. Wissensch. zu Berlin 1898, p. 159—168 »Ueber die Verteilung des induzierten Magnetismus in Cylindern«, von Dr. L. Holborn.

langen Stab an, so rücken bei diesem die Pole an die Enden, und man hat als Polabstand die Länge des Stabes einzusetzen. Dann ist aber ql wiederum das Volumen des Stabes.

Man kann demnach statt des vorigen Ausdrucks schreiben:

$$4\pi \frac{M}{v}.$$

Nun bezeichnet man $\frac{M}{v}$ mit $\mathfrak{J}$ und nennt diese Grösse die *Intensität der Magnetisierung* oder auch den *specifischen Magnetismus.* Man hat dann, wenn für X in die Gleichung (5) $4\pi\mathfrak{J}$ eingesetzt wird:

(6) . . . . $\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J}.$

§ 7. Entmagnetisierende Kraft.

Bei einem magnetisierten Stabe oder Ellipsoïde treten, wie wir bereits in § 1 und 2 sahen, in der Nähe der Enden die Kraftlinien in den umgebenden Raum aus, oder, mit anderen Worten, es ist an den Enden freier Magnetismus angehäuft. Dieser freie Magnetismus übt auf alle Punkte im Innern des Eisens in gleicher Weise eine magnetische Kraft aus, wie auf den äusseren Raum. Die Kraft im Innern ist aber entgegengesetzt gerichtet der äusseren magnetisierenden Kraft der Spule, in welcher sich der Stab oder das Ellipsoïd befindet. Die Resultante der in dem Eisenkörper wirksamen magnetischen Kraft wird daher kleiner sein als das aus der Berechnung sich ergebende Feld der Spule. Man nennt diese abschwächende Wirkung der Enden des Stabes oder Ellipsoïdes die *entmagnetisierende Kraft* der Enden. Dieselbe ist bei Stäben im allgemeinen nur experimentell zu bestimmen. Bei Rotationsellipsoïden dagegen, welche gleichförmig magnetisiert sind, lässt sich diese Kraft berechnen. Es ist nämlich in diesem Falle der Betrag, um welchen man das ungestörte magnetische Feld

der Spule zu verkleinern hat, proportional der Magnetisierungsintensität des Ellipsoïdes. Der Proportionalitätsfaktor heisst der *Entmagnetisierungsfaktor* und wird mit N bezeichnet. Bedeutet also $\mathfrak{H}'$ die Stärke des ungestörten Feldes und $\mathfrak{H}$ die des thatsächlich wirksamen, so hat man die verbindende Gleichung:

$$(7) \quad \mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N\mathfrak{J}.$$

Der Proportionalitätsfaktor N lässt sich nach F. Neumann [1]) für langgestreckte Rotationsellipsoïde (sogenannte Ovoïde) aus der Formel berechnen:

$$(8) \quad N = \frac{4\pi}{\mathfrak{m}^2 - 1}\left[\frac{\mathfrak{m}}{\sqrt{\mathfrak{m}^2 - 1}} \operatorname{lgn}\left(\mathfrak{m} + \sqrt{\mathfrak{m}^2 - 1}\right) - 1\right].$$

Hierin bedeutet $\mathfrak{m}$ das Achsenverhältnis des Ellipsoïdes und ist $= \frac{a}{b}$, wenn $2a$ die Länge der Rotationsachse und $2b$ diejenige des Durchmessers des zu dieser senkrechten Aequatorialkreises bedeutet.

Für grosse Werte von $\mathfrak{m}$ genügt zur Berechnung die Formel:

$$(9) \quad N = \frac{4\pi}{\mathfrak{m}^2}(\operatorname{lgn} 2\mathfrak{m} - 1).$$

Für kreiscylindrische Stäbe von verschiedenem Achsenverhältnis hat Herr Riborg Mann [2]) experimentell die Entmagnetisierungsfaktoren [3]) bestimmt und ist hierbei zu dem Resultat gekommen, dass dieselben nur wenig von den Entmagnetisierungsfaktoren der Ovoïde ab-

---

1) F. Neumann, »Vorlesungen über die Theorie des Magnetismus«, Leipzig 1881, p. 74; Crelles Journ. 37, p. 44, 1848.

2) Charles Riborg Mann, »Ueber Entmagnetisierungsfaktoren kreiscylindrischer Stäbe«. Inaug.-Dissertation, Berlin, Mayer & Müller, 1895.

3) Man kann bei Stäben nur mit einer gewissen Annäherung von konstanten Entmagnetisierungsfaktoren sprechen, da dieselben in Wirklichkeit etwas von dem Werte der Magnetisierungsintensität abhängig sind.

weichen. Vorausgesetzt ist hierbei allerdings, dass die Stäbe nach der im § 23 angeführten magnetometrischen Methode untersucht werden, bei welcher die mittlere Magnetisierungsintensität der im allgemeinen nicht gleichförmig magnetisierten Stäbe bestimmt wird. Tabelle 1 giebt einen Ueberblick über Entmagnetisierungsfaktoren von Cylindern und Ovoïden für verschiedene Achsenverhältnisse.

Tabelle 1 [1]).
Entmagnetisierungsfaktoren.

Ovoïde		Cylinder	
m	*N*	m	*N*
5	0,7015	5	0,6800
10	0,2549	10	0,2550
20	0,0848	20	0,0898
25	0,0587	25	0,0628
50	0,0181	50	0,0183
100	0,0054	100	0,0052
300	0,00075	300	0,00075

§ 8. Geschlossener magnetischer Kreis.

Will man die entmagnetisierende Wirkung der Enden vermeiden, so muss man dafür Sorge tragen, dass die stets in geschlossenen Kurven verlaufenden Kraftlinien auch einen in sich geschlossenen Eisenweg vorfinden. Man hat also statt eines Stabes einen geschlossenen Eisenring zu nehmen. Bewickelt man diesen längs seines ganzen Umfanges gleichförmig (s. § 4) und schickt nun einen Strom durch die Wicklung, so können jetzt, da keine Enden vorhanden sind, auch keine Kraftlinien mehr in den umgebenden Raum austreten. Es verlaufen also sämtliche Kraftlinien innerhalb des Eisens, und zwar

1) Die Werte für die Ovoïde sind aus der Gleichung (8) berechnet und diejenigen für die Cylinder der Abhandlung von Herrn Charles Riborg Mann entnommen.

konzentrisch. Da infolgedessen keine entmagnetisierende Kraft auftritt, so wird das Feld der Spule nicht abgeschwächt, und die Feldstärke berechnet sich aus der Gleichung (3). Dies gilt allerdings nur mit einer gewissen Annäherung. Wie leicht ersichtlich, ist nämlich bei der Ringbewicklung die Anzahl der Windungen auf der Längeneinheit am äusseren Umfange kleiner als am inneren. Das Feld wird also in radialer Richtung nicht vollkommen gleichförmig sein. Wählt man indessen den Durchmesser des mittleren Ringumfanges genügend gross gegen den Durchmesser des Eisenquerschnittes, so kann man die Differenz zwischen der Anzahl Wicklungen auf der Längeneinheit des inneren und äusseren Umfanges vernachlässigen. Die Länge L, welche man dann in die Gleichung (3) einzusetzen hat, ist gleich dem mittleren Umfange des Eisenringes.

§ 9. Geschlitzter Ring.

Der Fall des vollkommen geschlossenen Eisenringes kommt nur in Betracht bei der Untersuchung magnetischer Materialien in Ringform. Von grösster Wichtigkeit dagegen für die Technik und auch für die meisten magnetischen Untersuchungsmethoden und Apparate ist der Fall, dass der magnetische Kreis an einer oder mehreren Stellen unterbrochen ist, dass er Schlitze oder Fugen besitzt, welche mit einem nicht magnetischen Medium ausgefüllt sind. An diesen Schlitzen und Fugen werden sich naturgemäss magnetische Pole ausbilden. Es wird dort freier Magnetismus auftreten. Dieser entsteht dadurch, dass die magnetischen Kraftlinien in den Schlitzen und Fugen und in deren Nähe in den umgebenden Raum austreten, wie es etwa Fig. 3 für einen einfach geschlitzten Eisenring zeigt. Der freie Magnetismus an diesen Polen wird in gleicher Weise wie beim Stabe und Ellipsoïde eine entmagnetisierende

Kraft ausüben, welche sich natürlich nur experimentell bestimmen lassen kann. Für einen einfach geschlitzten Ring ist diese experimentelle Untersuchung bei verschiedenen Schlitzweiten von Herrn Lehmann [1]) ausgeführt worden. Wird ein vorhandener Schlitz derart

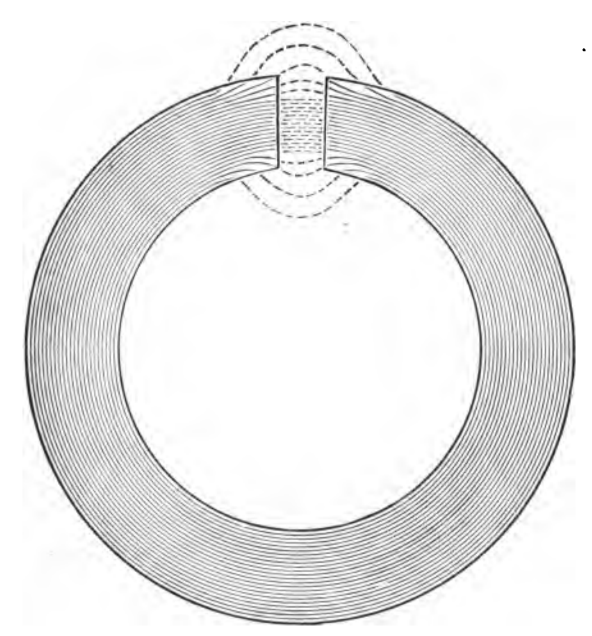


Fig. 3.

verengert, dass das vorher getrennte Eisen sich wieder berührt, so wird doch die entmagnetisierende Wirkung des Schlitzes nicht vollständig beseitigt. Auch selbst ein Zusammenschweissen kann die entmagnetisierende Wirkung der vorher vorhandenen Fuge nicht gänzlich aufheben. Es ist daher bei allen magnetischen Unter-

1) Heinrich Lehmann, »Magnetisierung radial geschlitzter Eisenringe«. Wied. Ann. 48, p. 406—445, 1893.

suchungsmethoden und Apparaten, bei welchen unvollständig geschlossene magnetische Kreise in Betracht kommen, notwendig, den Einfluss der Schlitze und Fugen experimentell zu bestimmen, wenigstens wenn man absolute Werte der magnetischen Grössen erhalten will.

§ 10. Streuung, Streuungskoëfficient.

Die im vorigen Paragraphen beschriebene Erscheinung des Austritts der Kraftlinien an Schlitzen und Fugen und die hierbei auftretende Divergenz derselben nennt man die *Streuung*. Bestimmt man den mittleren Induktionsfluss in dem Eisen selbst und dividiert ihn durch die Grösse des Induktionsflusses innerhalb des Schlitzes, den man z. B. mittels einer im Schlitze befindlichen flachen Sekundärspule bestimmen kann, so erhält man den sogenannten *Streuungskoëfficienten*, welcher mit ν bezeichnet wird. Derselbe ist, wie Herr Lehmann gezeigt hat, von dem Verhältnis des Durchmessers des Eisenkörpers zur Weite des Schlitzes, der sogenannten relativen Schlitzweite, abhängig.

§ 11. Permeabilität und Susceptibilität.

Bringt man zwei unmagnetische, den Dimensionen nach gleiche Eisenstäbe in das gleiche magnetische Feld, so ist es nicht nötig, dass die beiden Eisenstäbe auch den gleichen Magnetismus annehmen. Vielmehr ist es teils von der chemischen Zusammensetzung und teils von der Bearbeitung und Behandlung des Materials abhängig, wie gross der Induktionsfluss in dem Stabe ist. Ein sehr weicher schmiedeeiserner Stab wird eine sehr hohe Induktion, ein Gusseisenstab eine bei weitem niedrigere, ein weicher und ein gehärteter Stahlstab wiederum andere Werte der Induktion aufweisen. Es sind also die verschiedenen Eisenmaterialien verschieden durchlässig für die Kraftlinien. Man nennt diese Durch-

lässigkeit für die Kraftlinien die *Permeabilität* eines Materials. Ein Mass für dieselbe ist der Quotient $\frac{\mathfrak{B}}{\mathfrak{H}}$, welcher mit μ[1]) bezeichnet wird.

Bestimmt man statt $\mathfrak{B}$ die Intensität der Magnetisierung $\mathfrak{J}$, so giebt auch der Quotient $\frac{\mathfrak{J}}{\mathfrak{H}}$ uns ein Mass für die Durchlässigkeit oder auch mit anderen Worten für die Aufnahmefähigkeit des Magnetismus. Diesen Quotienten nennt man die *Susceptibilität* oder auch den *Magnetisierungskoëfficienten* und bezeichnet ihn mit $\varkappa$. $\varkappa$ und μ stehen, wie leicht aus den Beziehungen zwischen $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{J}$ zu entwickeln ist, in Verbindung durch die Gleichung:

(10) . . . . . . $\mu = 4\pi\varkappa + 1.$

§ 12. Magnetischer Kreisprozess.

Der Wert der in einem Magnetfelde von bestimmter Stärke erreichten Induktion hängt bei den verschiedenen Materialien, wie wir soeben sahen, von der Permeabilität des Materials ab. Wir setzten hierbei voraus, dass das Material im unmagnetischen Zustande in das Feld gebracht wurde. Diese Bedingung war notwendig, weil auch bei einem und demselben Materiale der bei einer bestimmten Feldstärke erreichte Induktionswert abhängig ist von dem magnetischen Zustande, in welchem sich das Material vorher befand, d. h. also von der „magnetischen Vorgeschichte" des Materials. Will man daher für verschiedene Materialien vergleichbare Resultate erhalten, so ist es notwendig derartige Bedingungen für die Untersuchung vorzuschreiben, dass man unabhängig von der „magnetischen Vorgeschichte" des Materials wird. Gleichzeitig sollen auch durch die magne-

---

1) μ ist ebenso wie $\varkappa$ nicht konstant, sondern ändert sich mit $\mathfrak{B}$ bezugsweise $\mathfrak{J}$. Vergl. § 17.

tische Untersuchung diejenigen Grössen gewonnen werden, welche für die Beurteilung der magnetischen Güte eines Materials von besonderer Wichtigkeit sind. Beides lässt sich am besten erreichen, wenn man mit dem Material einen sogenannten vollständigen *magnetischen Kreisprozess* ausführt, bei welchem man dasselbe möglichst bis zur Sättigung magnetisiert. Hierbei verfährt man folgendermassen. Man bringt das Material in eine Magnetisierungsspule, lässt in derselben, von einem bestimmten Maximum der Feldstärke ausgehend, die magnetisierende Kraft allmählich abnehmen und durch Null hindurch nach Kommutieren des magnetisierenden Stromes auf einen gleich grossen entgegengesetzten Wert anwachsen und kehrt dann wiederum allmählich auf den Anfangswert zurück. Die hierbei nach irgend einer Beobachtungsmethode gewonnenen Werte der Feldintensität $\mathfrak{H}$ und der zugehörigen Induktion $\mathfrak{B}$ trägt man am besten in ein Koordinatennetz ein, und zwar in Richtung der Abscissenachse die Werte von $\mathfrak{H}$, in Richtung der Ordinatenachse die Werte von $\mathfrak{B}$[1]). Man erhält dann eine Kurven-

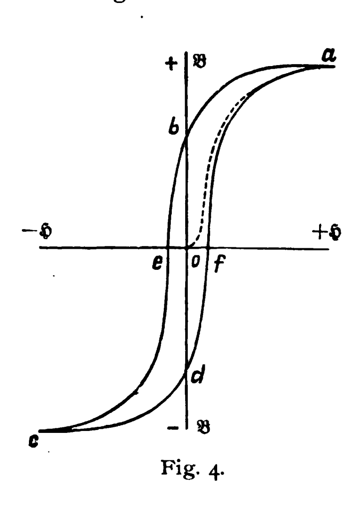


Fig. 4.

---

1) Um in der graphischen Darstellung eine gewisse Einheitlichkeit zu erzielen, ist vor kurzem von der Firma Siemens & Halske in Charlottenburg Koordinatenpapier für Induktionskurven in den Handel gebracht worden, auf welchem in Richtung der Ordinatenachse 1 cm = 1000 Induktionslinien gesetzt ist. Die Teilung in dieser Richtung geht bis zu $\mathfrak{B} = 20000$. In Richtung der Abscissenachse sind keine Zahlenangaben gemacht, damit es

schleife, wie sie Fig. 4 schematisch darstellt. Es ist (schon aus Symmetriegründen) klar, dass der Teil *ecdf* der Kurve dem Teil *fabe* kongruent sein muss, falls man nur auf der positiven und negativen Seite der Induktionswerte bis zum gleichen Maximum der Feldstärke und hiermit auch der Induktion aufsteigt. Dies bestätigt sich bei allen Untersuchungen [1]).

Der Verlauf der Kurve *abcda* ist im allgemeinen abhängig von dem benutzten Maximum der Feldstärke. Die Form der Kurve ändert sich indessen nicht mehr wesentlich, sobald man einen gewissen Wert der Feldstärke erreicht hat. Da es nämlich nicht möglich ist ein Eisenmaterial über eine gewisse Grenze hinaus zu magnetisieren, d. h. da die Intensität $\mathfrak{J}$ der Magnetisierung einem gewissen Grenzwerte, dem Sättigungswerte, zustrebt, so wird der Wert der Induktion, wenn man die Gleichung $\mathfrak{B} = 4\pi\mathfrak{J} + \mathfrak{H}$ betrachtet, jenseits dieses Grenzwertes nur noch um die Aenderung der Feldstärke zunehmen. In Wirklichkeit wird der Sättigungswert erst bei sehr hohen Feldstärken erreicht, doch ändert sich $\mathfrak{J}$ zuletzt sehr langsam, so dass man bereits bei mittleren Feldstärken den Sättigungsgrad als beinahe erreicht ansehen kann. In diesem Falle ändert sich

---

möglich ist, bis zu verschiedenen Werten von $\mathfrak{H}$ zu gehen. Für weiches Eisen wird im allgemeinen als Maximum $\mathfrak{H} = 150$ genügen. Es sind dann 2 mm = 1 Dyne.

1) Falls bei irgend einer Untersuchungsmethode oder einem Apparate die beiden für positive und negative Werte der Induktion gewonnenen Teile der Schleife voneinander abweichen, so hat dies meist seinen Grund in irgend welchen störenden äusseren Einflüssen (wie z. B. des erdmagnetischen Feldes oder dergleichen). Es genügt dann für entsprechende positive und negative Werte von $\mathfrak{H}$ das arithmetische Mittel der Werte $\mathfrak{B}$ (ohne Vorzeichen) zu nehmen, wenn man nicht die äusseren Störungen in einfacher Weise kompensieren oder gänzlich beseitigen kann.

dann auch die Gestalt der Induktionskurve nur derart, dass sich dieselbe bei *a* bezw. *c* (Fig. 4) in Form von beinahe geraden Linien fortsetzt. So genügt es für praktische Zwecke, wenn man bei leicht magnetisierbaren Materialien, also weichem Eisen, die Feldstärke bis zu etwa 150 C. G. S.-Einheiten, und bei magnetisch härteren Materialien, wie Stahl, bis zu etwa 300 C. G. S.-Einheiten anwachsen lässt. Setzt man also fest, dass man stets bis zu einem bestimmten Grenzwerte der Feldstärke aufsteigt und dann einen vollständigen magnetischen Kreisprozess ausführt, so erhält man für die verschiedenen Materialien vergleichbare Resultate.

Welche Grössen nun für die Beurteilung der magnetischen Güte eines Materials in Betracht kommen und wie man dieselben aus der Kurvenschleife (Fig. 4) entnehmen kann, sei noch in kurzem an der Hand der Fig. 4 erläutert.

§ 13. Magnetische Hysteresis.

Wie aus Fig. 4 ersichtlich ist, gehören zu jedem Werte der Feldstärke zwei Werte der magnetischen Induktion (ausgenommen beim Maximum), d. h. es ist zum Erreichen eines bestimmten Induktionswertes nicht gleichgültig, ob man von einer höheren Induktion ausgehend an diesen Punkt gelangt oder von einer geringeren, ob man sich auf dem absteigenden (Teil *abe* oder *cdf*) oder dem aufsteigenden Ast (*ec* oder *fa*) der Kurve befindet. Es ist also bei den magnetischen Materialien das Bestreben vorhanden, einen einmal erlangten magnetischen Zustand festzuhalten. Dieses Zurückbleiben hinter der Einwirkung des magnetischen Feldes heisst *magnetische Hysteresis.* Man nennt daher auch die Kurvenschleife *abcda* eine *hysteretische* oder *Hysteresis-Schleife.*

§ 14. Energieumsatz durch Hysteresis.

Die magnetische Hysteresis kann als ein Widerstand betrachtet werden, welcher dem erregenden magnetischen Felde entgegengesetzt wird. Da zur Ueberwindung dieses Widerstandes eine gewisse Menge Energie erforderlich ist, so geht ein Teil der aufgewendeten elektrischen Energie für die Magnetisierung verloren. In Wirklichkeit verschwindet diese Energie natürlich nicht, sie wird vielmehr nur in eine andere Energieform umgesetzt, und zwar in Wärme, welche in dem magnetisierten Eisenkörper auftritt. Man spricht daher von dem *Energieumsatz durch magnetische Hysteresis.* Die Wirkung dieses *Energieumsatzes* oder dieser *Energievergeudung* zeigt sich z. B. in den Transformatoren, deren Eisenkörper schnell wechselnden magnetischen Kreisprozessen ausgesetzt sind. Infolgedessen erwärmen sich die Transformatorenkerne unter Umständen recht beträchtlich.

Die Grösse des Energieumsatzes durch Hysteresis kann man nach Herrn Warburg[1]) aus der in Fig. 4 gezeichneten Kurvenschleife direkt entnehmen. Sie ist nämlich proportional dem Inhalt des von den einzelnen Kurventeilen umgrenzten Flächenstückes. Die Grösse der Fläche ist gegeben durch $\int \mathfrak{B}\, d\mathfrak{H}$, der Proportionalitätsfaktor ist $\frac{1}{4\pi}$. Es ist demnach der Energieumsatz durch Hysteresis, den wir mit E bezeichnen wollen:

$$(11) \quad \ldots \ldots \quad E = \frac{1}{4\pi} \int \mathfrak{B}\, d\mathfrak{H}.$$

Da alle Grössen in den Einheiten des absoluten elektromagnetischen C. G. S.-Systems ausgedrückt werden

---

1) E. Warburg, „Magnetische Untersuchungen", Wied. Ann. 13, p. 141—164, 1881; vergl. auch Warburg und Hönig, Wied. Ann. 20, p. 814—835, 1883.

sollen, so erhalten wir den Wert der Energievergeudung pro Kubikcentimeter des Materials in Ergs [1]).

Die von der Kurvenschleife eingeschlossene Fläche kann mittels eines Planimeters bestimmt werden [2]). Man kann also in einfacher Weise verschiedene Materialien in Bezug auf den Wert ihres Energieumsatzes vergleichen, indem man die von den Induktionskurven eingeschlossenen Flächen ihrer Grösse nach vergleicht. Hierbei ist natürlich vorausgesetzt, dass man bei den beiden zu vergleichenden Materialien bis zur gleichen Feldstärke aufgestiegen ist oder, falls man den Vergleich bei einer bestimmten Anzahl Induktionslinien vornehmen will, bis zur gleichen Induktion.

Die Güte eines magnetischen Materials ist hiernach in erster Linie zu beurteilen nach der Grösse der von der Hysteresisschleife eingeschlossenen Fläche. Fassen wir zunächst nur diejenigen magnetischen Materialien ins Auge, welche zu Dynamomaschinen, Motoren und Transformatoren verwendet werden, und sehen ab von den zu permanenten Magneten verarbeiteten Materialien, so ist ein Eisen desto schlechter, je grösser der Flächeninhalt der Hysteresisschleife ist.

§ 15. Koërcitivkraft und Remanenz.

Wie sich aus der Fig. 4 ersehen lässt, ist der Flächeninhalt der Hysteresisschleife u. a. abhängig von der Grösse des (übrigens nicht an allen Stellen gleichen) horizontalen Abstandes der beiden Kurvenäste. Dieser hat an einer

---

1) Für die in der Technik häufig vorkommende praktische Einheit Watt bezw. Kilowatt besteht die Beziehung: 1 Kilowatt = 1000 Watt = 10^{10} Erg pro Sekunde.

2) Ein bei dem Mangel eines Planimeters einzuschlagendes Verfahren ist das Auswägen der Fläche. Hierbei schneidet man sich die Fläche aus Papier aus und bestimmt ihr Gewicht, nachdem man vorher eine ihren Dimensionen nach bekannte Fläche, die aus demselben Papier herzustellen ist, abgewogen hat.

Stelle eine besondere charakteristische Bedeutung. Es ist nämlich der halbe Abstand (*oe* oder *of*) der beiden Kurvenäste auf der Abscissenachse gleich dem Betrag der Feldstärke, welcher erforderlich ist, um den Wert der bei der Feldstärke Null noch vorhandenen Induktion (*ob* oder *od*) auf Null zu bringen. Diese Grösse nennt man die *Koërcitivkraft.* Je grösser dieselbe ist, desto grösser wird auch, wie leicht ersichtlich ist, der Inhalt der von den Kurven eingeschlossenen Fläche, desto grösser also auch die Energievergeudung durch Hysteresis. Man kann daher aus dem geringen Werte der Koërcitivkraft bereits einen Schluss auf die Güte des Materials ziehen.

Die Koërcitivkraft ist anderseits von besonderer Bedeutung bei der Beurteilung eines Materials, welches für permanente Magnete Verwendung finden soll. Je grösser dieselbe nämlich ist, desto weniger leicht wird ein Eisen durch magnetische Felder von geringer Stärke beeinflusst werden, desto weniger wird es also seinen Magnetismus verlieren, und dies wird gewünscht bei permanenten Magneten.

Den bei der Feldstärke Null noch vorhandenen Induktionswert, welcher in Fig. 4 durch die Strecke *ob* oder *od* gekennzeichnet wird, nennt man die Remanenz. Auch diese Grösse ist von Wichtigkeit für die Beurteilung der magnetischen Materialien, besonders derjenigen, aus welchen permanente Magnete hergestellt werden. Bei diesen kommt übrigens nicht sowohl der absolute Betrag der Remanenz in Frage, sondern vor allem das Verhältnis derselben zu dem Werte der maximalen Induktion.

§ 16. Steinmetzscher Koëfficient der magnetischen Hysteresis.

Statt die Energievergeudung zum Vergleich für die Güte der Materialien zu verwenden, wird jetzt vielfach in

der Technik eine Grösse benutzt, welche von Herrn Steinmetz[1]) in die magnetischen Rechnungen eingeführt ist. Herr Steinmetz hat nämlich gefunden, dass die Energievergeudung bei verschiedenen Werten der maximalen Induktion nahezu proportional der 1,6ten Potenz von $\mathfrak{B}$ ist. Den Proportionalitätsfaktor nennt er den *Koëfficienten der magnetischen Hysteresis* und bezeichnet ihn mit η, so dass die Gleichung besteht:

$$(12) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad E = \eta \cdot \mathfrak{B}_{max.}^{1,6},$$

wobei $\mathfrak{B}_{max}$ den erreichten maximalen Wert der Induktion bedeutet. Aus seinen eigenen Versuchen und aus Untersuchungen, welche vor nicht langer Zeit in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt[2]) angestellt worden sind, geht indessen hervor, dass dieser Koëfficient nur mit grosser Vorsicht zu benutzen ist. Geht man bei der Bestimmung der Induktion für verschiedene Materialien bis nahe zur Sättigung und berechnet den Koëfficienten η, so lässt sich derselbe in diesem Falle wohl zum Vergleich der untersuchten Materialien gebrauchen. Hat man aber für ein Material einen von der Sättigung noch erheblich entfernten Wert von $\mathfrak{B}$ als Maximum der Induktion beobachtet und benutzt nun die bis zu diesem Werte gehende Kurvenschleife zur Berechnung von η, so kann man unter Umständen recht erhebliche Fehler machen[3]). Ebenso darf man nur dann den Energieumsatz E für eine andere als die beobachtete Induktion aus der Gleichung (12) be-

1) Chas. Steinmetz, »Elektrotechnische Zeitschrift« 12, p. 62, 1891; 13, p. 43—48, 55—59, 1892.

2) A. Ebeling und Erich Schmidt, »Ueber die magnetischen Eigenschaften der neueren Eisensorten und den Steinmetzschen Koëfficienten der magnetischen Hysteresis«. »Elektrot. Zeitschrift« 18, p. 276, 1897, »Stahl und Eisen« 17, p. 444, 1897.

3) Dieselben können nach den Versuchen an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt unter geeigneten Umständen bis zu etwa 40% betragen.

rechnen, wenn der neue Wert der Induktion nicht allzu sehr von dem beobachteten abweicht.

§ 17. Permeabilitätskurve.

Im § 11 wurde der Begriff der Permeabilität erläutert. Da die Werte $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ nicht in gleichem Verhältnis sich ändern, so ist es klar, dass auch die Permeabilität μ für verschiedene Werte von $\mathfrak{B}$ bezw. $\mathfrak{H}$ verschiedene Grösse hat. Auch hier ist wiederum die graphische Darstellung am geeignetsten, um sich den Verlauf von μ für die verschiedenen Werte von $\mathfrak{B}$ zu veranschaulichen. Um die Werte von μ zu berechnen, benutzt man nun nicht irgend einen Kurvenast der Hysteresisschleife, sondern beobachtet die Aenderung der Induktion für den Fall, dass man vom unmagnetischen Zustande des Materials aufsteigt und durch allmähliches Anwachsenlassen der Feldstärke bis zum Maximum von $\mathfrak{B}$ gelangt. Die dann erhaltene Kurve, welche in Fig. 4 gestrichelt dargestellt ist, nennt man wohl auch die *jungfräuliche Kurve* oder bezeichnet sie als *Nullkurve.*

§ 18. Kommutierungskurve.

Eine gewisse Aehnlichkeit mit der Nullkurve besitzt die sogenannte *Kommutierungskurve.* Auch bei dieser beginnt man mit dem unmagnetischen Zustande des Materials. Man erhält dieselbe folgendermassen. Vom unmagnetischen Zustande ausgehend, steigt man bis zu einem bestimmten Werte der Induktion auf. Bevor man diesen indessen beobachtet, wechselt man erst einige Male die Feldrichtung. Dann geht man zu einem weiteren Werte der Induktion, indem man auch hier wiederum die Feldrichtung wechselt. In dieser Weise fährt man bis zum Maximum der Induktion fort.

Um den für die Nullkurve und die Kommutierungskurve notwendigen unmagnetischen Anfangszustand zu

erhalten, ist es erforderlich, den in der Probe etwa vorhandenen Magnetismus zu beseitigen.

Man erreicht dies am einfachsten durch *Entmagnetisierung* mittels sogenannter *absteigender Kommutierung*. Hierbei schwächt man, während die Eisenprobe in der Spule sich befindet, vom Maximum der Stromstärke ausgehend, unter andauerndem Kommutieren den magnetisierenden Strom stetig ab.

II. Untersuchungsmethoden.

§ 19. Einleitung.

Bei der Bestimmung der magnetischen Eigenschaften eines Eisenmaterials ist für die Auswahl der Untersuchungsmethode die Frage entscheidend, ob man absolute Werte erhalten will, oder ob relative Angaben genügen. In einer grossen Zahl von Fällen, vielleicht sogar in der Mehrzahl der in der Technik vorkommenden Untersuchungen, wird es sich lediglich darum handeln festzustellen, ob das eine Eisenmaterial in magnetischer Beziehung an Güte ein anderes übertrifft, und der Hütteningenieur wird meistenteils erst dann absolute Zahlenangaben wünschen, wenn es ihm nicht mehr gelingt ein Material zu verbessern, und er nun wissen will, welchen Grad der magnetischen Güte er bei diesem Material erreicht hat.

§ 20. Absolute Messung.

Während für die relativen Messungen verschiedene Untersuchungsmethoden und Messapparate zur Verfügung stehen, ist die Gewinnung absoluter Werte zunächst nur auf zwei Weisen möglich, und zwar durch die Untersuchung entweder eines *Rotationsellipsoïdes* nach der *magnetometrischen* Methode[1]) oder eines *Ringes*

1) Dieselbe wird auch *Ablenkungsmethode* genannt.

nach der *ballistischen* Methode. Beide Untersuchungsarten sind indessen mit mancherlei Schwierigkeiten verknüpft und an Räume gebunden, welche möglichst frei sind sowohl von Erschütterungen als auch von allen magnetischen Störungen, wie sie teils durch Bewegung grösserer Eisenmassen, teils durch starke elektrische Ströme hervorgerufen werden. Die Anwendung der beiden Methoden wird daher in der Technik nur eine sehr beschränkte sein. Es ist nun aber die Möglichkeit gegeben auch mit den anderen Messmethoden absolute Werte zu erhalten, welche für den Hütteningenieur einen meistenteils genügenden Grad von Genauigkeit besitzen. Man kann dies auf die in den folgenden Paragraphen beschriebene Weise erreichen.

§ 21. Scheerung, Scheerungslinien.

Vergleicht man die für ein Eisenmaterial gewonnene absolute Induktionskurve mit der nach einer anderen Methode für dasselbe Material gewonnenen Kurvenschleife, so sieht man, dass die Kurven mehr oder weniger gegeneinander verschoben sind. Es gehören zu entsprechenden Werten der Induktion verschiedene Werte der Feldstärke, wie dies z. B. Fig. 5 zeigt, in welcher A die absolute und B die nach einer der anderen Methoden gewonnene Kommutierungskurve eines und desselben Materials darstellt.

Man kann nun die Kurve B mit der Kurve A zur Deckung bringen, wenn man die Werte der Feldstärke $\mathfrak{H}$ nicht von der Ordinatenachse OX, sondern von einer Hilfsachse OX' aus einträgt. Der Abstand dieser Hilfsachse von OX ist bei den verschiedenen Induktionswerten gleich der Differenz der Feldstärkenwerte der beiden Kurven A und B.

Das Verschieben der Kurve B in die Kurve A nennt man das *Scheeren* oder die *Scheerung* der Kurve B. Die

Hilfsachse OX' nennt man *Scheerungslinie.* Dieselbe verläuft nur in seltenen Fällen als vollständig gerade Linie; doch lässt sich oft für praktische Zwecke mit genügender Annäherung eine gerade Linie als Hilfsachse verwenden.

Verläuft die Hilfsachse geradlinig, so heisst dies mit anderen Worten, dass die Feldstärkenwerte der

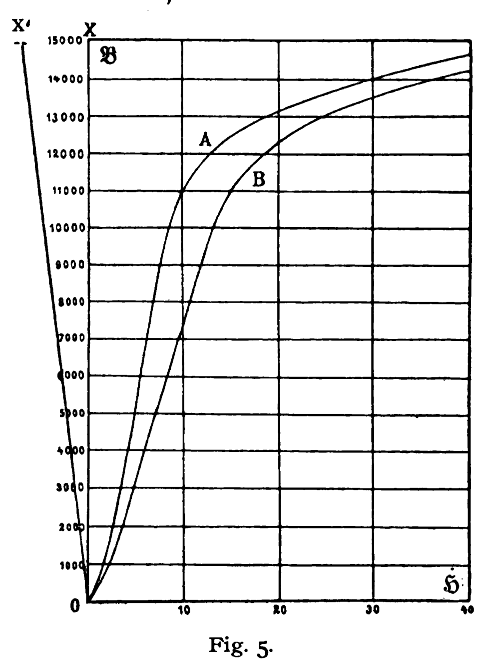


Fig. 5.

Kurve B um einen gewissen Betrag vermindert werden müssen, welcher proportional der Induktion $\mathfrak{B}$ ist. Nun ist aber nach Gleichung (6) im § 6

$$\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{B} - \mathfrak{H}}{4\pi},$$

oder, da die Grösse $\mathfrak{H}$ für kleine und mittlere Werte praktisch gegen $\mathfrak{B}$ vernachlässigt werden kann,

$$\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{B}}{4\pi}.$$

Es ist also die Grösse, um welche jeder Feldstärkenwert der zu scheerenden Kurve *B* vermindert werden muss, proportional der Magnetisierungsintensität $\mathfrak{J}$, d. h. wir haben die Gleichung:

$$\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N\mathfrak{J},$$

worin für $\mathfrak{H}$ die Feldstärkenwerte der absoluten Kurve *A* und für $\mathfrak{H}'$ die Feldstärkenwerte der zu scheerenden Kurve *B* zu setzen sind, während *N* den Proportionalitätsfaktor bedeutet. Diese Gleichung entspricht der Gleichung (7) im § 7. Es ist daher der Proportionalitätsfaktor *N* als Entmagnetisierungsfaktor zu betrachten. Durch die Scheerung wird hiernach dasselbe Resultat erzielt, welches man erhält, wenn man die entmagnetisierende Wirkung in Rechnung setzt.

Fig. 6.

Verläuft die Scheerungslinie nicht geradlinig, so ersieht man daraus, dass der Entmagnetisierungsfaktor *N* keine Konstante, sondern für die einzelnen Werte von $\mathfrak{B}$ verschieden und daher nur experimentell zu bestimmen ist.

Bei hysteretischen Schleifen haben die einzelnen Teile der Schleife nicht immer die gleichen Scheerungskurven; vielmehr entspricht jedem Kurvenast eine besondere Scheerungslinie. Derartige Scheerungskurven stellt z. B. Fig. 6 dar.

Durch diese Art der Scheerung wird nicht nur die Hysteresisschleife verschoben, sondern auch ihr Flächen-

inhalt geändert. Da nun nach Gleichung (11) im § 13 die Energievergeudung dem Flächeninhalt der Hysteresisschleife proportional ist, so ist diese Scheerung von grosser Wichtigkeit bei der Bestimmung der Energievergeudung von Eisenmaterialien, z. B. von Transformatorblechen. Man kann in diesem Falle die Scheerung auch in der Weise anwenden, dass man die Grösse der von den zwei Scheerungslinien eingeschlossenen Fläche von dem Flächeninhalt der ungescheerten Hysteresisschleife in Abzug bringt.

§ 22. Bestimmung der Scheerungskurven für die verschiedenen Untersuchungsmethoden.

Nach den Erläuterungen im vorigen Paragraphen ist es klar, dass es möglich wäre, mit allen Untersuchungsmethoden absolute Werte zu erhalten, wenn zu jeder Untersuchungsmethode und zu jedem Apparate für alle verschiedenen Eisenmaterialien eine bestimmte Scheerungskurve gehörte, die vorher durch Berechnung oder experimentell gefunden werden könnte. Nun haben aber Versuche, welche in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt angestellt worden sind, ergeben, dass es wenigstens bei den bisher untersuchten Apparaten und Methoden nicht möglich ist, völlig eindeutige Scheerungskurven für eine Methode zu erhalten[1]). Indessen sind bei einigen Apparaten und Methoden diese Unterschiede derart gering, dass sie für viele technische Untersuchungen, welche nur einen angenäherten Grad von Genauigkeit erfordern, vernachlässigt werden können.

---

1) Vergl. A. Ebeling und Erich Schmidt, »Untersuchungen über die du Boissche magnetische Wage«, Zeitschrift für Instrumentenkunde 16, p. 361, 1896; E. Orlich, »Untersuchungen über den Koepselschen Apparat zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften des Eisens«, Zeitschrift für Instrumentenkunde 18, p. 42, 1898.



Da ausserdem für Materialien, welche einen ähnlichen Verlauf der Induktionskurven zeigen und keine grossen Unterschiede in der Koërcitivkraft aufweisen, die Scheerungskurven fast völlig identisch sind, so lassen sich, falls man eine grössere Genauigkeit verlangt, gewisse Gruppen (weiches Eisen, Gusseisen, weicher Stahl, gehärteter Stahl) zusammenfassen, für deren jede man besondere Scheerungskurven aufstellen kann.

Für absolute Messungen erfolgt die genaue Feststellung der Scheerungskurven für eine bestimmte Methode und eine bestimmte Art des Materials im allgemeinen am besten in der Weise, dass man den Eisenkörper (meistenteils einen cylindrischen Stab), welcher nach der betreffenden Methode untersucht ist, zu einem Ellipsoïd abdreht, und dieses dann magnetometrisch prüft. Es ist für eine genaue und einwandsfreie Bestimmung der Scheerungskurven nötig, dass zu beiden Untersuchungen das gleiche Stück verwendet wird, da sich bei den Versuchen in der Reichsanstalt gezeigt hat, dass die Eisenmaterialien oft recht ungleichmässig[1]) sind und daher zwei verschiedene Stücke, wenn auch demselben Material entnommen, doch recht verschiedene Werte ergeben können. Dass durch die Bearbeitung des Stabes beim Abdrehen zum Ellipsoïd keine Veränderung der magnetischen Eigenschaften des Eisenmaterials bewirkt wird, lässt sich nach den bisherigen Versuchen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt als wahrscheinlich annehmen.

---

1) Vergl. den Bericht über die Thätigkeit der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in der Zeit vom 1. März 1894 bis 1. April 1895, Zeitschr. für Instrumentenkunde 15, p. 331, 1895; A. Ebeling und Erich Schmidt, »Ueber magnetische Ungleichmässigkeit und das Ausglühen von Eisen und Stahl«, Zeitschr. für Instrumentenkunde 16, p. 77—80, 1896, Wied. Ann. 58, p. 330 bis 341, 1896.

Um nicht bei jeder Methode, deren Scheerungskurven man gewinnen will, die zeitraubende und mühsame Arbeit der magnetometrischen Untersuchung eines Ellipsoïdes vornehmen zu müssen, kann man auch für technische Zwecke bei einer Methode möglichst genau die Scheerungskurven — eventuell für verschiedene Gruppen von Eisenmaterialien — bestimmen und dann die mit dieser Methode unter Benutzung der festgestellten Scheerungskurven gewonnenen Werte als absolute benutzen. Eine Methode, die sich in dieser Hinsicht als Ersatz für die magnetometrische besonders eignet, ist die später noch genauer zu besprechende *Jochmethode,* welche unter günstigen Bedingungen bereits ohne Benutzung von Scheerungskurven fast absolute Werte liefert. Hat man nach dieser Methode eine Anzahl von Stäben, etwa für jede Gruppe der verschiedenen Eisenmaterialien einen, untersucht und deren absolute Induktionskurven mit Hilfe der Scheerungskurven bestimmt, so kann man diese Stäbe als *Normal-Prüfstäbe*[1]) für andere magnetische Untersuchungsmethoden verwenden.

Die genaue Feststellung der Scheerungskurven für einen magnetischen Untersuchungsapparat unter Benutzung der magnetometrischen Methode wird wohl kaum in einem technischen Laboratorium ausgeführt werden können, vielmehr werden derartige Bestimmungen in den meisten Fällen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt überlassen werden müssen. Es ist daher im allgemeinen die Kenntnis der magnetometrischen Methode und der Untersuchung eines Ringes nach der ballistischen Methode für den Hütteningenieur nicht erforderlich. Da indessen

---

1) Absolute Induktionskurven für solche Normalprüfstäbe werden in der II. Abteilung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt bestimmt.

die ballistische Methode nicht allein bei der Untersuchung eines Ringes, sondern auch bei verschiedenen anderen Untersuchungsarten in Betracht kommt, so ist es notwendig, dieselbe im folgenden eingehender zu besprechen, während die magnetometrische Methode nur kurz ihrem Wesen nach erläutert werden soll.

§ 23. Die magnetometrische Methode[1]).

Bei der *magnetometrischen* Methode wird durch den magnetisierten Eisenkörper, welcher in Gestalt eines Rotationsellipsoïdes zur Untersuchung gelangt, ein kleiner Magnet in einem Magnetometer abgelenkt und dessen Ablenkung beobachtet. Aus der Grösse der Ablenkung, der Entfernung des Ellipsoïdes von dem Magnet, den Dimensionen des Ellipsoïdes und der Horizontalintensität des erdmagnetischen Feldes, welche für den Ort der Beobachtung bestimmt werden muss, kann man dann die Magnetisierungsintensität des Ellipsoïdes berechnen. Um diese für verschiedene Feldstärken bestimmen zu können, bringt man das Ellipsoïd in eine genügend lange Magnetisierungsspule, und zwar so, dass die Rotationsachse des Ellipsoïdes mit der Richtung der Spulenachse zusammenfällt, und beobachtet bei verschiedenen Stromstärken in der magnetisierenden Spule. Die Einwirkung der Spule allein auf das Magnetometer wird in geeigneter Weise durch eine zweite, gleichzeitig von dem Magnetisierungsstrom durchflossene Spule, eine sogenannte Kompensationsspule, aufgehoben, welche zugleich nach Art einer Tangentenbussole zur Bestimmung der Horizontalintensität des Erdfeldes dienen kann.

---

1) Eingehende Angaben über diese Methode siehe z. B. in J. A. Ewing, »Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen«. Deutsch von L. Holborn und St. Lindeck. 1892. Berlin-München, Julius Springer und R. Oldenbourg, p. 36—58.

§ 24. Die ballistische Methode.

1. Grundprinzip der Methode.

Die *ballistische* Methode beruht im Grundprinzip auf der Messung der Elektrizitätsmenge kurzer Stromstösse mittels eines sogenannten *ballistischen Galvanometers*. Diese momentanen Stromstösse erteilen dem Magnetsystem des Galvanometers eine Geschwindigkeit und rufen infolgedessen einen Ausschlag hervor, welcher der gesamten Elektrizitätsmenge des Stromstosses proportional ist. Es entstehen die Stromstösse oder Induktionsstösse bei jeder plötzlichen Aenderung der magnetischen Induktion des zu prüfenden Eisenkörpers in einer denselben umschliessenden Spule, der Sekundärspule. Um eine derartige plötzliche Aenderung in der magnetischen Induktion zu bewirken, wird der magnetisierende Strom in der den Eisenkörper ebenfalls umgebenden Magnetisierungsspule, der Primärspule, sprungweise geändert.

2. Versuchsanordnung.

Fig. 7 giebt die Versuchsanordnung für ballistische Messungen, welche in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt benutzt wird. In derselben stellt *I* den Magnetisierungsstromkreis oder den primären Kreis und *II* den sekundären Kreis dar. Im Kreise *I* ist die Magnetisierungsspule *P* mit einer Akkumulatorenbatterie *B* von geeigneter Spannung, einer Anzahl von Regulierwiderständen *W* und einigen Normalwiderstandsbüchsen *N*, wie solche nach den Angaben der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt hergestellt werden, verbunden. Der Schlüssel O_1 gestattet den Stromkreis zu öffnen und zu schliessen, der Stromwender *K* die Richtung des magnetisierenden Stromes in der Magnetisierungsspule zu wechseln. Die Regulierwiderstände *W* müssen derart eingerichtet sein, dass es möglich ist, den magnetisierenden Strom zwischen dem benutzten Maximum und Null

sprungweise zu ändern, ohne jedoch zwischen den einzelnen Stufen den Strom ausschalten zu müssen.

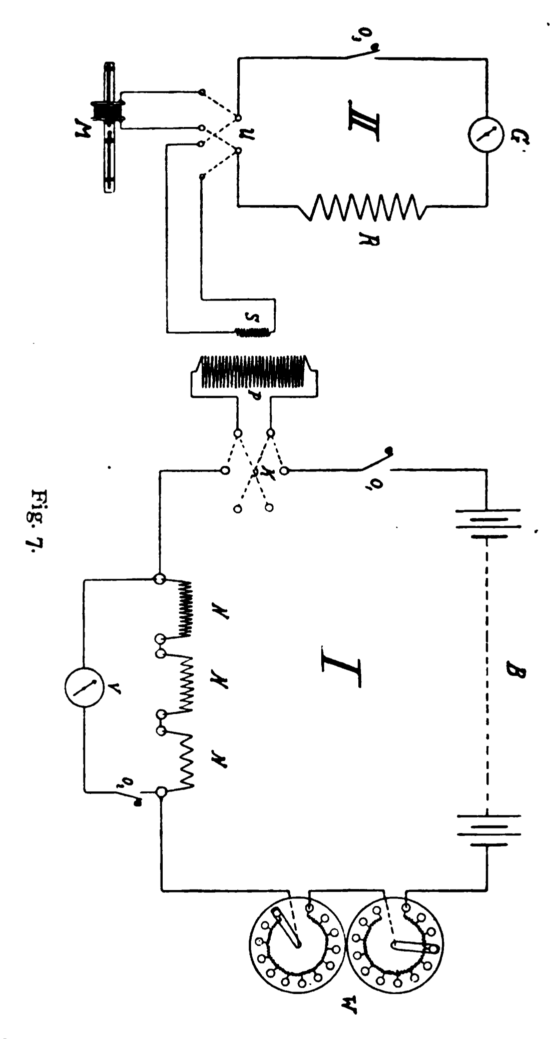


Fig. 7.

Die Normalwiderstandsbüchsen N dienen dazu, mit Hilfe eines zu denselben parallel geschalteten geeigneten Spannungszeigers V (etwa eines Millivoltmeters von Siemens

& Halske) die Stärke des magnetisierenden Stromes zu messen. O_2 ist ein Schlüssel, durch welchen der Spannungszeiger ein- und ausgeschaltet werden kann.

Im Kreise *II* ist *S* die Sekundärspule, welche den zu untersuchenden Eisenkörper umgiebt. Dieselbe befindet sich in Wirklichkeit entweder innerhalb der Magnetisierungsspule oder umschliesst diese, während sie in der Fig. 7 nur der Deutlichkeit wegen neben dieselbe gezeichnet ist. Diese Spule *S* ist verbunden mit dem ballistischen Galvanometer *G* und einem Stöpselrheostaten *R*, welcher gestattet, dem Galvanometer Ballastwiderstand vorzuschalten. Der Schlüssel O_3 dient dazu, den sekundären Stromkreis zu öffnen und zu schliessen.

Durch den Umschalter *U* kann statt der Sekundärspule *S* ein sogenannter Weberscher *Doppelmagnet-Induktor M* mit dem Galvanometer verbunden werden. Derselbe ermöglicht es, wie später noch genauer erläutert werden soll, das Galvanometer zu aichen.

3. Das ballistische Galvanometer.

Das *ballistische Galvanometer* muss derart eingerichtet sein, dass seine Schwingungsdauer [1]) gross ist gegen die Zeit, in welcher ein Stromstoss abläuft. Ein solcher durch Induktion hervorgerufener Stromstoss verläuft nämlich in Wirklichkeit nicht momentan, vielmehr ist hierfür eine gewisse, wenn auch meistens nur sehr wenige Bruchteile einer Sekunde betragende, Zeit erforderlich. Es muss infolgedessen die Schwingungsdauer des

1) Man nennt Schwingungsdauer die Zeit, welche zwischen der grössten Ablenkung auf der einen Seite der Nulllage des Galvanometers bis zur nächsten auf der anderen Seite verfliesst. Eine für ballistische Galvanometer im allgemeinen genügend lange Schwingungsdauer ist z. B. eine Zeit von etwa 10 Sekunden.





ballistischen Galvanometers so gross sein, dass der Stromstoss bereits vollständig abgelaufen ist, bevor das Magnetsystem sich merkbar aus seiner Ruhelage entfernt hat.

Während es für viele ballistische Untersuchungen von Wichtigkeit ist, dass das Galvanometer nur eine geringe Dämpfung besitzt, kann bei den im allgemeinen in Betracht kommenden magnetischen Messungen die Dämpfung gross sein, nur muss dann untersucht werden, ob auch die Ausschläge den Aenderungen der Induktion proportional bleiben.

4. *Beobachtungsmethode.*

Soll die Hysteresisschleife für ein Untersuchungsmaterial bestimmt werden, so führt man nach der im § 12 beschriebenen Weise einen vollständigen magnetischen Kreisprozess aus. Hierbei ist zu beachten, dass das betreffende Material, falls es nicht nahezu bis zur Sättigung magnetisiert wird, stets vor Beginn der Beobachtung entmagnetisiert werden muss, da andernfalls durch etwa vorhandenen remanenten Magnetismus die Gestalt der hysteretischen Schleife verändert werden kann. Die Bestimmung einer Nullkurve oder einer Kommutierungskurve geschieht nach der in §§ 17 und 18 angegebenen Weise. Bei der Ausführung der Beobachtungen wird bei jeder sprungweisen Aenderung der Stromstärke der durch Induktion hervorgerufene ballistische Ausschlag des Galvanometers abgelesen, und gleichzeitig die erreichte Stromstärke mit Hilfe des Spannungszeigers und der Normalwiderstände bestimmt.

5. *Konstruktion der Induktionskurven.*

Zur Konstruktion der Induktionskurven hat man die Werte der Feldintensität $\mathfrak{H}$ und der stufenweisen Aenderung $\Delta\mathfrak{B}$ der Induktion zu berechnen.

Die Feldintensität $\mathfrak{H}$ ist, falls keine entmagnetisierende Kraft auftritt, gegeben durch die Gleichung (3) im § 4

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi n i}{L}.$$

Ist dagegen eine entmagnetisierende Wirkung vorhanden, so hat man entweder, falls der Entmagnetisierungsfaktor konstant ist, die Gleichung (7) im § 7 $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}' - N\mathfrak{J}$ anzuwenden, in welcher dann $\mathfrak{H}' = \frac{4\pi n i}{L}$ zu setzen ist, oder man hat die Werte $\mathfrak{H}'$ bei der Zeichnung der Kurve zu benutzen und dann diese Kurve zu scheeren.

Für die Bestimmung der Werte von $\Delta\mathfrak{B}$ hat man folgendes zu beachten. Es ist der Ablenkungswinkel φ des Magnetsystems im Galvanometer proportional der durch das Galvanometer geschickten Elektrizitätsmenge Q, das heisst:

(13) . . . . $\varphi = CQ$,

wenn C einen Proportionalitätsfaktor bedeutet.

Nun ist die durch die magnetische Induktion erzeugte gesamte Elektrizitätsmenge Q

(14). . . . . . $Q = \frac{n_s q \Delta\mathfrak{B}}{w_s}$.

Hierin bedeutet n_s die Windungszahl der sekundären Spule, q den Querschnitt des zu untersuchenden Eisenstabes und w_s den Gesamtwiderstand des sekundären Kreises, welcher sich zusammensetzt aus dem Widerstand der sekundären Spule, dem Galvanometerwiderstand, dem Widerstand der verschiedenen Zuleitungsdrähte und dem vorgeschalteten Ballastwiderstand.

Setzt man den Wert von Q in die Gleichung (13) ein, so erhält man

(15) . . . . . $\Delta\mathfrak{B} = \frac{w_s \varphi}{n_s q} \frac{1}{C}$.

Der Ablenkungswinkel φ ergiebt sich bei kleinen Ablenkungen aus der Anzahl Skalenteile a und dem Ab-

stand A der Skala von dem Spiegel des Galvanometers (*Skalenabstand*), ausgedrückt in Skalenteilen (also Millimeter, wenn die Skala in Millimeter geteilt ist), in absolutem Mass (Bogenwerten) aus der Gleichung:

(16) . . . . $\varphi = \frac{a}{2A}$ [1]).

Setzt man diesen Wert in Gleichung (15) ein, so erhält man:

(17) . . . . . $\Delta\mathfrak{B} = \frac{w_s a}{2 A n_s q} \frac{1}{C}$.

Aus der Gleichung (13) ersieht man, dass der Wert $\frac{1}{C}$ diejenige Elektrizitätsmenge bedeutet, welche das Magnetsystem um den Winkel 1 (in Bogenwerten) ablenkt. Nennen wir diese Grösse, deren Bestimmung später noch genau erörtert werden soll, b, so hat man statt der Gleichung (17)

(18) . . . . . $\Delta\mathfrak{B} = \frac{b\, w_s a}{2 A n_s q}$ [2]).

Durch Summierung der einzelnen $\Delta\mathfrak{B}$ gewinnt man die Werte der Induktion $\mathfrak{B}$ selber. Da der mittlere

---

1) Für grössere Ablenkungen gilt die Reihe

$$\varphi = \frac{a}{2A}\left(1 - \frac{1}{3}\frac{a^2}{A^2} + \frac{1}{5}\frac{a^4}{A^4} \cdots\right).$$

Ist es überhaupt nötig, eine Korrektion anzubringen, so wird meistens das erste Korrektionsglied $\frac{1}{3}\frac{a^2}{A^2}$ genügen, und man hat einfach von dem Skalenausschlag a den Wert $\frac{1}{3}\frac{a^3}{A^2}$ zu subtrahieren. Am besten zeichnet man sich den Verlauf dieser Korrektion als Kurve auf, bei welcher in der einen Richtung die Anzahl Skalenteile und in der zur ersten senkrechten Richtung die Korrektionsgrössen eingetragen werden.

2) Beim Einsetzen der Zahlenwerte in die Gleichung ist zu beachten, dass die Einheit des Widerstandes im absoluten Masssystem $= 10^{-9}$ Ohm (int.) ist, dass also der in Ohm (int.) angegebene Wert des Widerstandes w_s mit 10^9 multipliziert werden muss, um denselben in absoluten Einheiten zu erhalten.

Wicklungsdurchmesser der Sekundärspule grösser ist als der Durchmesser des Eisenstabes, so ist bei einer genauen Bestimmung der absoluten Werte von $\mathfrak{B}$ noch eine Korrektion zu berücksichtigen. Es ist nämlich von dem Werte $\Delta\mathfrak{B}$ pro Quadratcentimeter des Querschnittes die Aenderung der Anzahl derjenigen Kraftlinien abzuziehen, welche in dem Raum verlaufen, der begrenzt ist von dem mittleren Wicklungsumfange der Sekundärspule und dem Umfange des Eisenstabes. Die Gesamtzahl dieser Linien beträgt (bei der Aenderung $\Delta\mathfrak{H}$ der Feldstärke) $(q'-q)\,\Delta\mathfrak{H}$, wenn q' den mittleren Querschnitt der Sekundärspule bedeutet. Auf die Einheit des Querschnittes kommen also dann $\frac{q'-q}{q}\Delta\mathfrak{H}$ Kraftlinien. Es ist demnach:

$$\Delta\mathfrak{B} = \frac{b\,w_s\,a}{2\,A\,n_s\,q} - \frac{q'-q}{q}\Delta\mathfrak{H}. \tag{19}$$

Die Korrektion kann für die Summe der $\Delta\mathfrak{B}$ beträchtlich werden, wenn man zu sehr hohen Feldstärken aufsteigt, und vor allem, wenn der mittlere Querschnitt der Sekundärspule erheblich grösser ist als der des Eisenstabes.

6. Aichung des ballistischen Galvanometers.

Um die Elektrizitätsmenge b zu bestimmen, welche den Ausschlag 1 im Galvanometer hervorruft, d. h. also die *Konstante des ballistischen Galvanometers*, benutzt man am besten die berechenbare Elektrizitätsmenge eines bekannten Induktionsstosses [1]). Einen solchen Induktionsstoss erzeugt man am einfachsten durch Kommutieren eines Stromes in einer langen, gleichmässig mit einer

1) Die Verwendung eines Kondensators, dessen Elektrizitätsmenge beim Laden oder Entladen durch das Galvanometer geschickt wird, ist wegen der Unsicherheit der Angaben eines Kondensators (infolge von Rückstandsbildung etc.) für genauere Messungen nicht zu empfehlen.

Windungslage bewickelten Magnetisierungsspule, über welche eine Sekundärspule mit einer grossen Anzahl Windungen geschoben ist. Da zur Berechnung der hierdurch erzeugten Elektrizitätsmenge der Durchmesser und die Windungszahl pro Centimeter an allen Stellen möglichst gleich und genau bekannt sein müssen, so ist beim Wickeln einer derartigen *Normalspule* grosse Sorgfalt zu verwenden. Für technische Zwecke wird es im allgemeinen genügen, wenn man auf ein Glasrohr von nicht zu geringem und möglichst gleichmässigem äusseren Durchmesser (z. B. 4 bis 5 cm bei einer Länge von etwa 1 m) eine Lage eines gut umsponnenen Kupferdrahtes gleichmässig aufwickelt[1]).

Durch den gesamten Querschnitt einer solchen Magnetisierungsspule verlaufen bei der Stromstärke i

$$\frac{4\pi n_p i}{L} q_p \text{ Kraftlinien,}$$

wenn q_p den Querschnitt, n_p die Windungszahl und L die Länge der Spule bedeutet. Hat die sekundäre

---

1) In der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt hat man Normalspulen hergestellt, die aus einem massiven Marmorcylinder, in den ein gleichmässiges Gewinde eingeschnitten ist, gearbeitet sind. In das Gewinde des Cylinders ist ein blanker Kupferleiter gelegt. Der Durchmesser einer dieser Spulen weist im Maximum eine Abweichung von nur 0,2% vom Mittelwerte auf. Für geringere Genauigkeit genügt es auch ein Glasrohr in warmem Zustande mit einer Hartgummischicht zu überziehen, diese gleichmässig abzudrehen und dann in dieselbe ein Gewinde einzuschneiden. Da es in der Technik nicht vorteilhaft ist, mit einer derart gegen Beschädigungen empfindlichen Spule zu arbeiten, so ist es zweckmässig eine kleine Spule von einer grossen Anzahl Windungen, welche etwa auf ein Porzellanrohr oder einen Buchsbaumcylinder gewickelt ist, als Primärspule zu benutzen. Eine derartige Spule ist nur von Zeit zu Zeit durch Vergleich mit einer Normalspule zu aichen, eine Untersuchung, welche in der II. Abteilung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vorgenommen wird.

Spule n_s Windungen und ist der Widerstand des sekundären Kreises $= w_s$, so ist die beim Kommutieren des Stromes durch das Galvanometer fliessende Elektrizitätsmenge $= 2 \frac{4\pi n_p i}{L} \frac{q_p n_s}{w_s}$. Diese ruft einen Ausschlag $\varphi' = \frac{a'}{2A}$ hervor, wenn φ' den Ausschlagswinkel und a' die Anzahl Skalenteile bedeutet. Es ist dann die Elektrizitätsmenge b, welche den Ausschlag 1 hervorruft,

$$(20) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad b = \frac{8\pi n_p i q_p n_s 2A}{L w_s a'}.$$

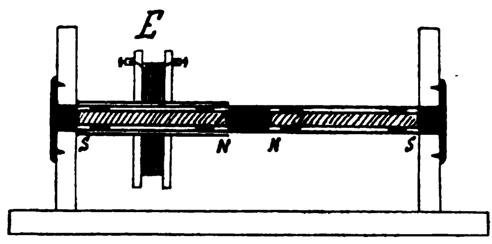


Fig. 8.

Da es im allgemeinen notwendig ist, bei jeder neuen Beobachtungsreihe die Konstante des ballistischen Galvanometers zu bestimmen und dies mit Hilfe einer Spule zu viel Zeit erfordert, so kann man auch, wie dies z. B. in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geschieht, einen *Weberschen Doppelmagnet-Induktor* verwenden. Derselbe besteht, wie Fig. 8 zeigt, aus zwei gleich stark magnetisierten Stabmagneten *NS* von gleichen Dimensionen, welche in einem Rohr derart befestigt sind, dass sie mit den gleichen Polen sich gegenüberstehen. Auf dem Rohr ist eine Spule *E* verschiebbar angeordnet, und zwar so, dass eine jede ihrer beiden durch Anschläge gesicherten Endstellungen sich über der Mitte eines Magnetstabes befindet. Schaltet man diese Spule in den

Galvanometerkreis statt der Sekundärspule S (Fig. 7) ein und verschiebt dieselbe aus der einen Endstellung in die andere, so erhält man einen Induktionsausschlag. Ist dieser Ausschlag einmal verglichen mit dem Ausschlag, welchen eine Normalspule von bekannten Dimensionen oder eine mit einer solchen geaichte beliebige Spule liefert, so kann man nun den Magnetinduktor zur Bestimmung der Konstante des ballistischen Galvanometers benutzen [1]).

Da sich der Magnetismus der Stäbe ändern kann [2]), so ist es notwendig den Magnetinduktor von Zeit zu Zeit wiederum mit einer Normalspule zu vergleichen.

7. *Anwendung der ballistischen Methode.*

Die ballistische Methode ist die einzige, nach welcher Eisenkörper untersucht werden können, welche einen vollständig geschlossenen magnetischen Kreis bilden, also z. B. ein Eisenring.

---

1) Bei der Aichung des Galvanometers kann man auch einen *Weberschen Erdinduktor* verwenden, welcher derart eingerichtet ist, dass eine grosse flache Spule, deren Achse in der Richtung des erdmagnetischen Meridians verläuft, um 180° gedreht werden kann. (Vergl. Ewing, »Magnetische Induktion« p. 60.) Da hierbei aber zur Berechnung die Horizontalkomponente des Erdmagnetismus, bezw. die in der Achse der Spule wirksame Komponente des am Orte der Beobachtung herrschenden magnetischen Feldes bekannt sein muss, so wird diese Aichungsmethode in der Technik wenig anwendbar sein.

2) Um die Aenderung des Magnetismus möglichst auszuschliessen, muss man die Magnetstäbe nach der Methode von Strouhal und Barus künstlich altern. Dies geschieht in der Weise, dass die Stäbe vor und nach der Magnetisierung jedesmal mehrere Stunden in siedenden Wasserdampf gebracht werden. Von grossem Vorteil ist es ausserdem die Magnetstäbe nach der Magnetisierung stark zu erschüttern. Vergl. Strouhal und Barus, Wied. Ann. 20, p. 662—684, 1883.

Ausserdem wird die ballistische Methode bei magnetischen Messungen, unter anderem zur Untersuchung von Stäben in einer Spule und nach der Jochmethode, verwendet.

Diese Anwendungen der ballistischen Methode sollen in den folgenden Paragraphen genauer besprochen werden.

§ 25. Schlussjochmethode.

Um die zeitraubende und mühsame Herstellung eines Ringes bei der magnetischen Untersuchung der verschiedenen Eisenmaterialien zu vermeiden und dennoch gleichzeitig den Vorteil eines nahezu geschlossenen magnetischen Kreises zu haben, kann man sich am besten der *Schlussjochmethode* bedienen, welche von J. Hopkinson[1]) zuerst angewendet worden ist. Bei dieser Methode ist es nicht nötig, die zu untersuchende Eisenprobe in irgend eine komplizierte Gestalt, wie die eines Ringes oder eines Ellipsoïdes, zu bringen, vielmehr können die Proben in Stabform untersucht werden. Auch eignet sich diese Methode zur Untersuchung von Transformator- und Ankerblechen, welche in Form dünner Bündel zur Prüfung gelangen. Die entmagnetisierende Kraft der Enden dieser Stäbe oder Bündel wird bei der Jochmethode dadurch fast völlig aufgehoben, dass man durch Verbindung der Enden mittels eines sogenannten *Schlussjoches*, welches dem Durchgang der Kraftlinien nur einen möglichst geringen Widerstand entgegensetzen darf, einen vollständig geschlossenen magnetischen Kreis herstellt. Der geringe magnetische Widerstand des Joches wird dadurch erreicht, dass einerseits dasselbe aus Eisen von hoher Permeabilität, also etwa aus bestem schwedischen Schmiedeeisen oder aus gutem Stahlguss, besteht, und

1) J. Hopkinson, »Magnetisation of iron«. Phil. Trans. 176, II, p. 455, 1885.



dass anderseits der Querschnitt des Joches gegen den des Stabes gross genommen wird.

1. *Anordnung der Jochmethode in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.*

Fig. 9 und 10 zeigen ein Joch mit den zugehörigen Teilen in der Anordnung, welche in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt üblich ist. Das in der Reichsanstalt zu laufenden Prüfungen verwendete Joch besteht aus Kruppschem Stahlguss und hat eine Länge von 33 cm,

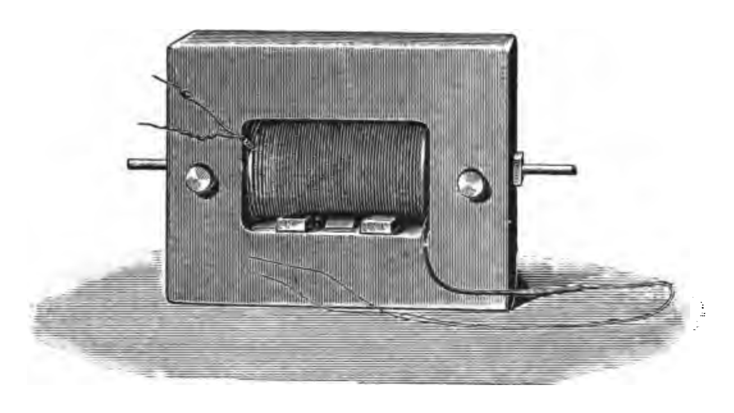


Fig. 9.

einen inneren Luftraum zur Aufnahme der Magnetisierungsspule von 25 cm Länge, 8 cm Höhe und 8 cm Breite und einen Querschnitt von 2 × 32 qcm. Da im allgemeinen bei den laufenden magnetischen Prüfungen in der Reichsanstalt cylindrische Eisenstäbe von 0,6 cm Durchmesser[1]) benutzt werden, was einem Querschnitt

1) Von den Antragstellern werden die Stäbe roh vorgedreht (35 cm Länge, 0,9 cm Durchmesser) eingeliefert und in der Reichsanstalt sorgfältig auf möglichst gleichmässigen Durchmesser abgedreht. Der Durchmesser wird am besten mittels einer Schraublehre bestimmt. Gelangen Blechbündel (aus etwa

von etwa 0,28 qcm entspricht, so beträgt der Querschnitt des Joches mehr als das 200 fache von dem der untersuchten Stäbe. Es genügt indessen schon, besonders für den Fall, dass es sich nur um relative Messungen handelt, oder die Scheerung genau berücksichtigt wird, wenn der Querschnitt des Joches ein geringeres Vielfaches (z. B. das 100 fache) des Querschnittes der Stäbe ist.

Zur Herstellung einer guten magnetischen Verbindung zwischen Joch und Stab, bezw. Blechbündel[1]),

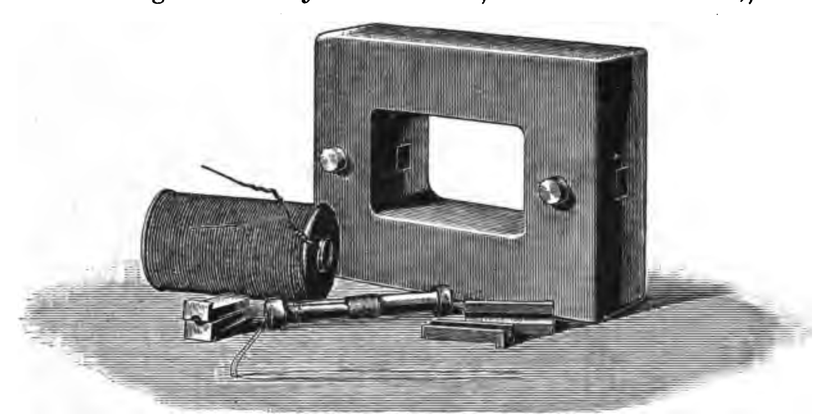


Fig. 10.

dienen passende Backen aus weichem Eisen, welche mittels der in Fig. 9 und 10 an der vorderen Seite des Jochs sichtbaren Schrauben angepresst werden. Der Stab oder das Bündel wird in seinem mittleren Teile

6 bis 8 Streifen von 33 cm Länge und 0,7 cm Breite bestehend) zur Untersuchung, so wird deren Querschnitt am sichersten durch Volumbestimmung mittels des spezifischen Gewichtes der betreffenden Blechsorte ermittelt.

1) Es ist von Vorteil bei den Blechbündeln, die in den Klemmbacken befindlichen Enden der Blechstreifen zur Erzielung eines guten magnetischen Schlusses mittels Schmirgelpapier von der anhaftenden Oxydschicht zu befreien.

eng umschlossen von einer kurzen (etwa 1 cm langen) Sekundärspule, welche aus einer grossen Anzahl Windungen dünnen Drahtes hergestellt ist, und befindet sich mit dieser Sekundärspule in der inneren Bohrung der Magnetisierungsspule. Letztere füllt den Luftraum des Joches vollständig aus und ist mit einer sehr grossen Zahl von Windungen dicken Drahtes (bei der in der Reichsanstalt benutzten Spule sind es etwa 2000 Windungen) gleichmässig bewickelt. Die Magnetisierungsspule wird in den Kreis I der Fig. 7 (S. 36) an Stelle der Spule P und die Sekundärspule in den Kreis II an Stelle der Spule S eingeschaltet. Die Beobachtung erfolgt

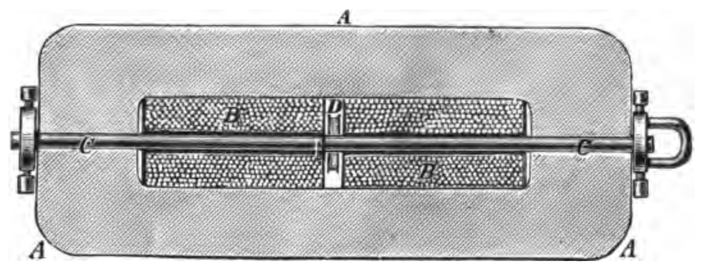


Fig. 11.

nach der im vorigen Paragraphen beschriebenen ballistischen Methode.

Wenn die Magnetisierungsspule den Stab auf seiner ganzen freien Länge im inneren Luftraum des Joches umgiebt, so ist die magnetisierende Kraft, welche auf den Stab wirkt, nur wenig verschieden von der totalen Kraft, welche von der Spule herrührt, welche also gegeben ist durch die Gleichung (3) im § 4

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi n i}{L} \text{[1]}.$$

---

1) Nach Hopkinson ist bei der Jochmethode L gleich der wirksamen Länge des Stabes zu setzen. Diese ist infolge des Ausbreitungswiderstandes an den Klemmbacken etwas grösser als die freie, von der Magnetisierungsspule umgebene Länge im Innern

Der bei der Jochmethode scheinbar vollständig geschlossene magnetische Kreis besitzt an den Stellen, wo der Stab und die Klemmbacken eingesetzt sind, noch eine Anzahl Fugen. An diesen bilden sich, wie wir im § 9 sahen, magnetische Pole aus. Es tritt also auch bei der Jochmethode eine gewisse, wenn auch nur sehr geringe entmagnetisierende Kraft auf, die es notwendig macht, falls man absolute Angaben erhalten will, die nach der im § 22 beschriebenen Methode erhaltenen Scheerungskurven zu benutzen. Diese Scheerungskurven weichen indes nach den Untersuchungen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt für einen Querschnitt des Joches, welcher etwa das 200 fache von dem der Stäbe beträgt, nicht mehr erheblich von der Ordinatenachse ab. Allerdings ergeben sich, wie bereits im § 22 angedeutet wurde, für Materialien von grösserer Koërcitivkraft, als sie das weiche Eisen besitzt, etwas andere Scheerungslinien. Bestimmt man jedoch für weiches Eisen mittlerer Güte die Scheerungskurven für die Jochmethode und benutzt diese bei den verschiedenen Materialien, so erhält man für technische Zwecke genügend genaue Werte. Wird dennoch eine grössere Genauigkeit verlangt, so kann man nach der im § 22 angedeuteten Weise verfahren und für die verschiedenen Gruppen der Eisenmaterialien verschiedene Scheerungskurven verwenden.

2. *Versuchsanordnung von J. Hopkinson.*

Statt der in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt üblichen Anordnung der Jochmethode kann man

---

des Schlussjoches. Indessen genügt es für technische Untersuchungen, die freie Länge des Stabes zu benutzen, da der Unterschied der beiden Längen für relative Messungen nicht in Betracht kommt und bei absoluten Bestimmungen der etwa begangene Fehler durch die Scheerung ausgeglichen wird.

auch die Anordnung benutzen, welche zuerst J. Hopkinson[1]) verwendet hat, und welche in Fig. 11 im Längsschnitt dargestellt ist. Hierbei besteht der Stab *CC* aus zwei Hälften, welche in der Mitte mit gut abgeschliffenen Endflächen aneinander stossen. Mittels eines Griffes kann die rechte Stabhälfte so weit herausgezogen werden, dass die in der Mitte befindliche und an einer Feder befestigte Sekundärspule *D* plötzlich aus dem Felde zwischen den Spulen *BB* herausgeschnellt wird. Man

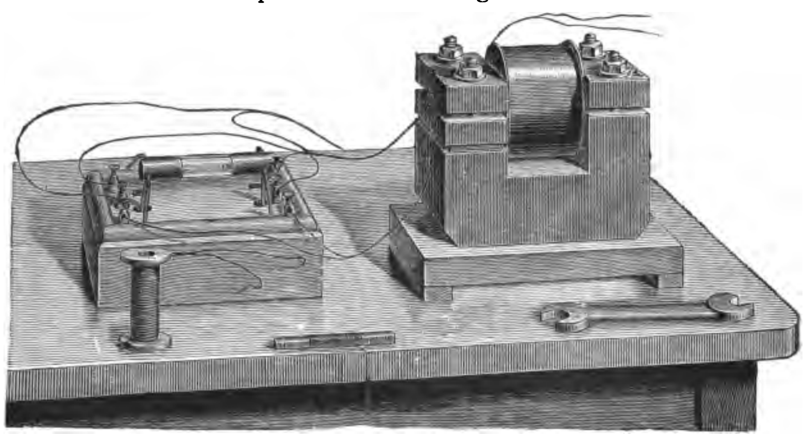


Fig. 12.

erhält hierdurch einen Induktionsstoss, welcher die Grösse des Induktionsflusses misst, der an der betreffenden Stelle geherrscht hat. Es lässt sich also auf diese Weise der jeweilige magnetische Zustand des Probestabes feststellen. Die Trennungsfläche zwischen den beiden Stabhälften befindet sich offenbar bei dieser Anordnung an einer ungünstigen Stelle. Durch den an dem Schnitt auftretenden freien Magnetismus werden infolgedessen die erhaltenen Angaben fehlerhaft beeinflusst. Es ist daher diese Anordnung für genauere Messungen wenig geeignet.

1) J. Hopkinson l. c.

3. *Siderognost von Corsepius.*

Ein für technische Zwecke bestimmter und auf der Jochmethode beruhender Apparat ist der von Corsepius [1]) beschriebene und in Fig. 12 dargestellte *Siderognost* (von σίδηρος, Eisen), bei welchem statt eines Doppeljoches ein einfaches U-förmiges Schlussjoch zur Verwendung kommt.

4. *Doppeljoch von Ewing.*

Ewing benutzt auch statt des einen Stabes zwei gleiche Stäbe desselben Materials, welche er durch zwei massive Verbindungsstücke aus weichem Eisen schliesst, wie es Fig. 13 zeigt. Hierbei befinden sich die Stäbe entweder in Ausbohrungen der Verbindungsstücke, oder es wird durch die magnetische Anziehungskraft zwischen

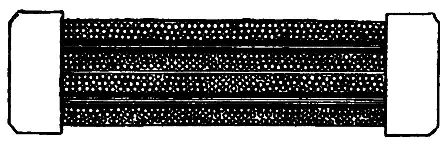


Fig. 13.

den möglichst eben abgeschliffenen Verbindungsstücken und den Endflächen der Stäbe automatisch der magnetische Schluss hergestellt.

§ 26. Untersuchung von Stäben in einer Spule nach der ballistischen Methode.

Bei relativen Messungen ist die ballistische Methode auch für die Untersuchung von Stäben in einer langen [2])

1) Corsepius, »Untersuchungen zur Konstruktion magnetischer Maschinen«, p. 46—61, Berlin 1891.

2) Wenn die Länge der Spule gegen den mittleren Durchmesser ihrer Wicklung klein ist, so hat man statt der Gleichung (3) im § 4 für genauere Bestimmungen die Gleichung

$$\mathfrak{H} = \frac{4\pi n i}{L} \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{d}{L}\right)^2}}$$

Magnetisierungsspule verwendbar. Die Versuchsanordnung entspricht dann vollständig der Fig. 7, welche im § 24 eingehend erläutert ist. Bei den zu untersuchenden Stäben treten in diesem Falle, besonders für geringe Werte des Achsenverhältnisses (§ 7), recht erhebliche entmagnetisierende Kräfte auf. Dieselben lassen sich für Stäbe, wie bereits früher gezeigt war (§ 7), nicht berechnen, auch sind die von Herrn Riborg Mann experimentell bestimmten Entmagnetisierungsfaktoren nur mit gewisser Einschränkung zu benutzen (§ 7). Will man daher ohne Berücksichtigung der entmagnetisierenden Kräfte vergleichbare Resultate erhalten, so muss man Stäbe von gleichen Dimensionen verwenden.

Die Anordnung der Sekundärspule kann bei dieser Art der Untersuchung auch so getroffen werden, dass es möglich ist, dieselbe von der Mitte [1]) des Stabes plötzlich abzuziehen und gänzlich aus dem Bereich der Kraftlinien zu entfernen. Es wird hierdurch dann der jeweilige magnetische Zustand des Stabes festgestellt. Auch in diesem Falle ist zu berücksichtigen, dass man nur bei Stäben von gleichen Dimensionen vergleichbare Resultate erhält.

---

zu setzen, in welcher *d* den mittleren Durchmesser der Wicklungen bedeutet. Ist die Länge der Spule zehnmal so gross wie ihr mittlerer Durchmesser, so beträgt die Korrektion nur noch etwa 0,5 %, eine Grösse, die fast immer vernachlässigt werden kann.

Die Spule muss ausserdem im Verhältnis zum Stab genügend lang sein, da sonst sich der Stab nicht in einem gleichförmigen Felde befindet. Soll z. B. die Feldstärke nur um 1 % an den verschiedenen Stellen des Stabes differieren, so darf der Stab nicht länger als $^7/_8$ der Länge der Spule sein. Soll die Differenz nur 0,1 % betragen, so darf die Länge des Stabes $^2/_3$ der Spulenlänge nicht überschreiten. Näheres vergl. W. Weber, »Elektrodynamische Massbestimmungen«, III, p. 446, 1852.

1) Es ist nötig, dass die Sekundärspule von der Mitte des Stabes (oder Hufeisens) abgezogen wird, damit dieselbe auch von allen Kraftlinien, welche vom Pole ausgehen, geschnitten wird.

Von besonderer Bedeutung ist letztere Art der Untersuchung für die Prüfung permanenter Magnete. Sind diese in Hufeisenform gegeben, so ist dies sogar die einzig mögliche Methode, um einwandsfreie Resultate zu erhalten[1]).

§ 27. Elektrodynamische Methoden.

Der ballistischen Methode ist die magnetische Induktionswirkung zu Grunde gelegt, welche, wie wir gesehen haben, darin besteht, dass in einer Spule bei der Magnetisierung eines Eisenstabes Stromstösse hervorgerufen werden. Ausser dieser Induktionswirkung üben aber die magnetischen Kraftlinien auch noch *mechanische* Kräfte aus, und zwar auf stromdurchflossene Leiter, welche sich im Bereiche der Kraftlinien befinden. Diese *elektrodynamische* Wirkung kann ebenfalls zur Konstruktion geeigneter Messapparate benutzt werden.

1. *Eisenuntersuchungsapparat der Firma Siemens & Halske (Koepselscher Apparat).*

Ein für technische Untersuchungen wegen seiner einfachen Handhabung und wegen der Genauigkeit seiner Angaben besonders geeigneter Apparat dieser Gattung ist der von Herrn Koepsel[2]) konstruierte und neuerdings von Herrn Kath[3]) verbesserte *Eisenuntersuchungsapparat der Firma Siemens & Halske*, welcher in Fig. 14

---

1) Die sonst übliche Untersuchung der Hufeisenmagnete nach der Tragkraftsmethode ist unter allen Umständen zu verwerfen, da man nach derselben infolge des Haftens durch Adhäsion u. s. w. eventuell bis zu 50% falsche Resultate erhält.

2) A. Koepsel, »Apparat zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften des Eisens in absolutem Mass mit direkter Ablesung von Siemens & Halske«. Elektrotechnische Zeitschrift 15, p. 214, 1894. Zeitschrift für Instrumentenkunde 14, p. 391, 1894.

3) Hubert Kath, »Der Magnetisierungsapparat der Firma Siemens & Halske A.-G.« Zeitschrift für Instrumentenkunde 18, p. 33 — 39, 1898. Elektrotechnische Zeitschrift 19, p. 411, 1898.

vollständig, in Fig. 15 mit abgenommener Schutzkappe und in Fig. 16 schematisch im Durchschnitt dargestellt ist. Mit demselben lassen sich, wie mit der Schlussjochmethode, in einfacher Weise die magnetischen Eigenschaften von Stäben und Blechbündeln untersuchen. Die Wirkungsweise des Apparates beruht darauf, dass eine stromdurchflossene Spule (*s* in Fig. 16), welche in

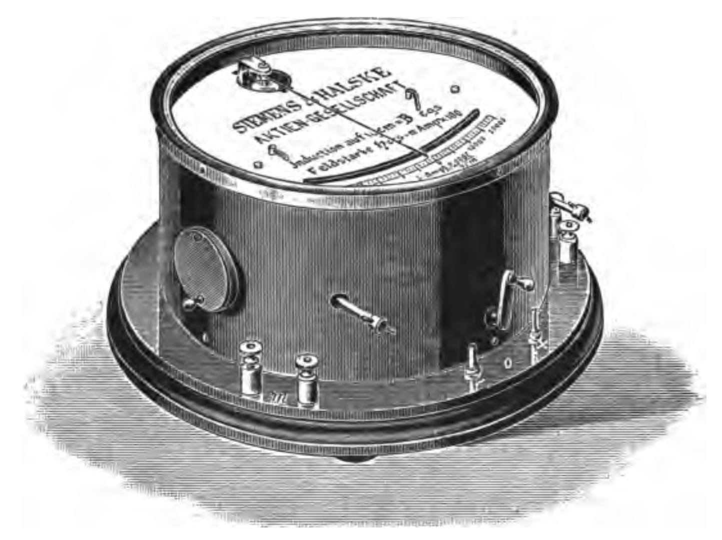


Fig. 14.

einem magnetischen Kraftlinienfelde drehbar befestigt ist, das Bestreben hat, sich mit ihrer Windungsfläche senkrecht zu den Kraftlinien einzustellen. Ist die Spule mit Federn verbunden, welche dieselbe in die Nulllage (Fig. 16) zurückzudrehen suchen, so ergiebt sich eine bleibende Ablenkung, deren Grösse bei gleicher Stärke der Federn von der Stromstärke in der beweglichen Spule und der Kraftlinienzahl des Feldes abhängig ist. Wird nun die Stromstärke in der Spule konstant gehalten, so ist dadurch die Möglichkeit gegeben, direkt die Kraftlinienzahl zu bestimmen.

Um die entmagnetisierenden Kräfte möglichst zu beseitigen, werden bei dem Koepselschen Apparat, wie bei der Schlussjochmethode, die Enden des zu untersuchenden Eisenstabes *P* (Fig. 16), welcher sich in der Magnetisierungsspule *S* befindet, durch ein eisernes Joch *JJ* von hoher Permeabilität zu einem magnetischen Kreise verbunden. Die eisernen Klemmbacken *K*, welche durch Messingschrauben fest angezogen werden können,

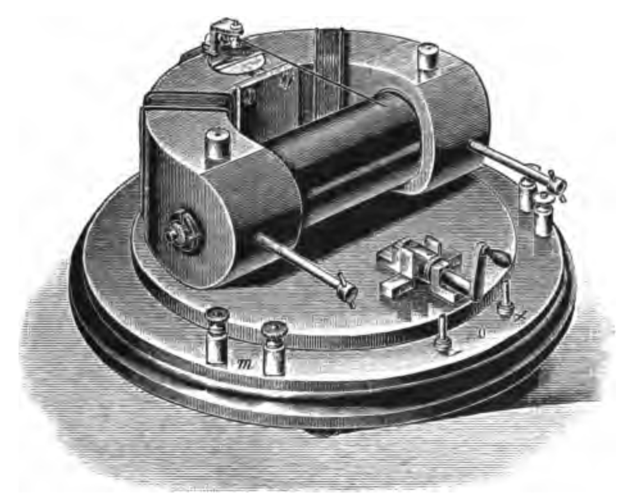


Fig. 15.

vermitteln den magnetischen Kontakt zwischen dem Joch und dem Stab. Das Joch ist in seinem mittleren Teile von oben bis unten durch einen cylindrischen Luftschlitz von 1 mm Weite unterbrochen. Innerhalb dieses Luftschlitzes schwingt die Spule *s*, welche durch die Torsion leichter Spiralfedern im stromlosen Zustande in der in Fig. 16 dargestellten Nulllage gehalten wird. Durch die Klemmen *m* und den Stromwender *U*, welcher in seiner Nullstellung zugleich als Ausschalter dient, wird der Magnetisierungsspule *S* und durch die Klemmen *h* der Spule *s* der Strom zugeführt.

Wird nun der Stab *P* durch den Strom in der Spule *S* magnetisiert, so verlaufen die magnetischen Kraftlinien durch das Joch *JJ* und erzeugen in dem Luftschlitze ein Kraftlinienfeld, welches die Spule *s*, sobald sie von dem Hilfsstrom durchflossen wird, aus ihrer Nulllage ablenkt. Ein mit der Spule verbundener langer Aluminiumzeiger (Fig. 14 und 15) ermöglicht es, die Grösse dieser Ablenkung auf einer Skala (Fig. 14) zu bestimmen.

Zur Regulierung und Messung der Stromstärke muss sowohl in den Magnetisierungs- als auch in den Hilfsstromkreis ein Regulierwiderstand und ein Strommesser eingeschaltet werden. Bei der Strommessung kann in gleicher Weise verfahren werden wie bei der ballistischen Methode im § 24.

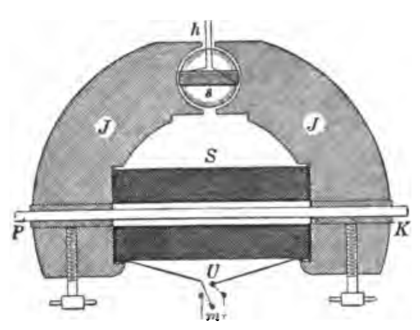


Fig. 16.

Da durch die Magnetisierungsspule allein (ohne eingelegten Eisenstab) in dem Joch Kraftlinien erzeugt werden, so sind auf dem Joch noch zwei Spulen angebracht (Fig. 15), welche, mit der Magnetisierungsspule in einen Stromkreis geschaltet, durch entgegengesetzte Magnetisierung des Joches die Wirkung der Magnetisierungsspule auf das Joch aufheben.

Um alle zu der Untersuchung notwendigen Nebenapparate (ausser den Stromzeigern) vereinigt zu haben, hat die Firma Siemens & Halske eine Magnetisierungsschaltung auf einem gemeinsamen Grundbrett montieren lassen. Diese Schaltung ist in Fig. 18 in der Gesamtansicht und in Fig. 17 schematisch dargestellt. *A* ist

der Koepselsche Apparat, dessen Magnetisierungsspule durch die Klemmen *m* und den Umschalter *U* den Strom aus der Batterie *B* erhält, der der Regulierwiderstand W_m vorgeschaltet ist. Mittels der Klemmen *h* wird der beweglichen Spule unter Einschaltung des Regulierwiderstandes W_h der Hilfsstrom aus drei Trockenelementen *E* zugeleitet. Die Stufen des Widerstandes W_m sind derart berechnet, dass sie bei der Aufnahme von Induktionskurven der verschiedensten weichen Eisensorten unter

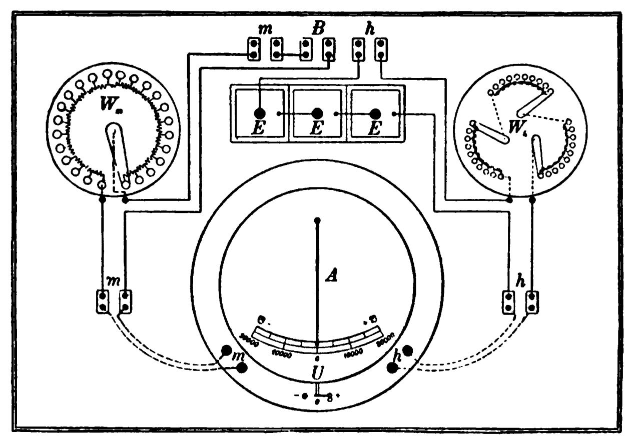


Fig. 17.

Benutzung einer 4 Volt-Batterie eine genügende Anzahl von geeigneten Beobachtungspunkten ergeben. Für die Bestimmung von Kurven gehärteten Stahls ist eine 8 Volt-Batterie zu verwenden.

An die Klemmen *m* und *h* am hinteren Rande des Grundbrettes werden die Strommesser angelegt. Der Magnetisierungsschaltung wird zur Strommessung ein einohmiges Präcisions-Milli-Volt- und Amperemeter beigefügt, mit welchem es in Verbindung mit einem geeigneten Nebenschlusswiderstand und einem besonderen Schaltbrett möglich ist, sowohl den Magnetisierungsstrom als auch den Hilfsstrom zu messen.

Bei den Untersuchungen mit dem Koepselschen Apparat ist zu beachten, dass keine Eisenstücke oder gar Magnete in die unmittelbare Nähe desselben gebracht werden, da diese auf die bewegliche Spule einwirken und infolgedessen fehlerhafte Angaben hervorrufen. Benutzt man also z. B. für die Strommessung Apparate mit starken Magneten, wie die Spannungs- und Stromzeiger von Siemens & Halske, so müssen dieselben in genügender Entfernung aufgestellt werden. Ebenso ist darauf zu achten, dass die zu untersuchenden Eisen-

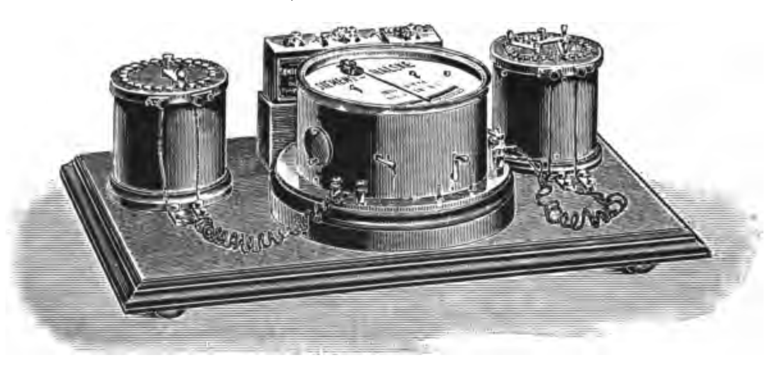


Fig. 18.

stäbe über das Joch nicht hinausragen, da nach den Untersuchungen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt[1]) diese hervorragenden Enden oft erheblichen Einfluss auf die bewegliche Spule haben können.

Vor Beginn der Beobachtung ist es notwendig, den Apparat so aufzustellen, dass der Erdmagnetismus keinen Einfluss auf die Spule ausübt. Dies erreicht man am einfachsten dadurch, dass man — ohne den Eisenstab einzulegen — den Hilfsstrom allein einschaltet und den Apparat nun so weit dreht, bis der Zeiger beim Ein-

1) E. Orlich, »Untersuchungen über den Koepselschen Apparat zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften des Eisens«. Zeitschrift für Instrumentenkunde 18, p. 39—43, 1898.

und Ausschalten des Stromes auf Null stehen bleibt. Ist diese Einstellung nicht vollständig erreicht, so erhält man trotzdem richtige Angaben mit dem Apparate, wenn man aus den auf den beiden Seiten erhaltenen Induktionswerten ($+\mathfrak{B}$ und $-\mathfrak{B}$) die Mittelwerte bildet.

Bei der Ausführung einer Beobachtung mit dem Apparat wird zunächst die Stärke des Hilfsstroms reguliert Dieselbe ergiebt sich aus der Beziehung:

$$\text{Hilfsstrom} = \frac{\text{Konstante}}{\text{Querschnitt des Prüfstabes}}.$$

Die Konstante [1]) ist auf jedem Apparate angegeben. Ist der Hilfsstrom nach dieser Gleichung richtig eingestellt, so liest man bei der nun folgenden magnetischen Untersuchung auf der Skala direkt die Grösse der Induktion pro Quadratcentimeter des Querschnitts ab. Nachdem dann der Stab in den Apparat eingelegt und mittels der Backen und Schrauben festgeklemmt ist, wird für jeden beobachteten Wert der Stromstärke die zugehörige Induktion bestimmt. Die Wicklungszahl und die Dimensionen der Magnetisierungsspule sind derart gewählt, dass sich aus der Stromstärke in Ampere durch Multiplikation mit 100 unmittelbar die Feldstärke in C. G. S.-Einheiten ergiebt. Benutzt man die Magnetisierungsschaltung der Firma Siemens & Halske, so liest man an dem Millivoltmeter direkt die Feldstärkenwerte ab.

Nach den Erfahrungen, welche die Physikalisch-Technische Reichsanstalt mit dem Apparat gemacht hat, verlaufen die Scheerungskurven für Stäbe von 6 mm

1) Die Konstante wird in der Weise bestimmt, dass ein Normalstab eingelegt und die Stärke des Hilfsstroms so lange verändert wird, bis die am Apparat abgelesene Grösse der maximalen Induktion mit dem für den Normalstab nach einer absoluten Methode bestimmten Maximum der Induktion übereinstimmt. Durch Multiplikation der Hilfsstromstärke mit dem Querschnitt des Stabes wird die Konstante erhalten.



Durchmesser ungefähr in gleicher Weise, wie bei dem in der Reichsanstalt benutzten Schlussjoch[1]). Das Arbeiten mit dem Apparate ist, vor allem bei dem Fehlen fast jeglicher Rechnung, äusserst einfach und bequem. Derselbe bietet nicht nur für relative Messungen, sondern bis zu einem gewissen Grade der Genauigkeit auch selbst für absolute Bestimmungen einen recht guten Ersatz für die Schlussjochmethode.

2. *Kurvenprojektor von Ewing.*

Zu der gleichen Gattung von Apparaten wie der Koepselsche gehört auch der *Kurvenprojektor* von Ewing[2]), welcher hier noch kurz erläutert werden soll. Bei diesem Apparate, welcher in Fig. 19 schematisch und in Fig. 20 in der Ansicht gezeichnet ist, wird die auf elektrodynamischer Wirkung beruhende seitliche Ausbuchtung zweier durch justierbare Gewichte gespannten Drahtsaiten AA und BB auf einen Spiegel E übertragen, der in zwei zu einander senkrechten Ebenen beweglich befestigt ist. Die Bewegungen der Drahtsaiten finden in diesen beiden Ebenen statt. Da nun die eine Drahtsaite, deren Bewegung in der horizontalen Ebene erfolgt, als Stromzuführung für die Magnetisierungsspule dient und sich gleichzeitig in einem konstanten magnetischen Felde, das von dem Eisencylinder C herrührt, befindet, so ist ihre seitliche Ausbuchtung proportional der Feldstärke $\mathfrak{H}$ in der Magnetisierungsspule. Anderseits ist die in der vertikalen Ebene stattfindende Ausbuchtung der zweiten Drahtsaite proportional der Induktion $\mathfrak{B}$ in dem Probestück. Diese Saite, welche von

1) Da sich bei hysteretischen Schleifen für die beiden Aeste verschiedene Scheerungslinien ergeben, so ist die Scheerung, um Fehler zu vermeiden, bei der Bestimmung der Energievergeudung in jedem Falle zu berücksichtigen (vergl. § 21, S. 30).

2) Ewing, Elektrotechnische Zeitschrift 13, pp. 516, 712, 1892 und 14, p. 451, 1893.

einem stets gleich starken Strom durchflossen ist, befindet sich nämlich in einem schmalen Schlitz zwischen zwei Polschuhen, welche auf die zwei zu diesem Apparate

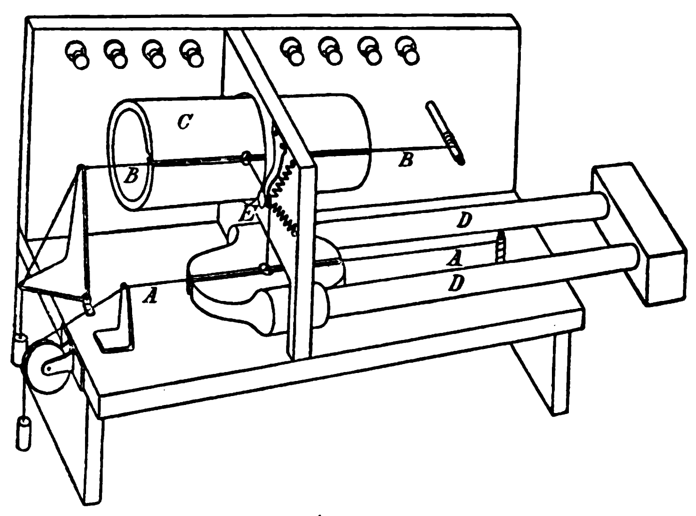


Fig. 19.

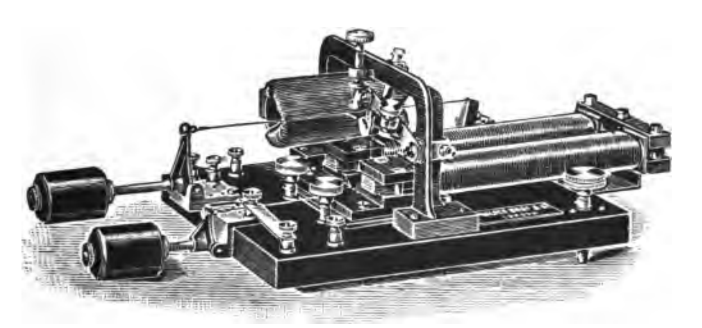


Fig. 20.

erforderlichen Stäbe *DD* des zu untersuchenden Materials aufgesetzt sind. Die von zwei Magnetisierungsspulen umschlossenen Probestäbe sind auf der anderen Seite durch ein Eisenjoch geschlossen, so dass bis auf den schmalen Schlitz ein vollständiger magnetischer Kreis

hergestellt ist. Zeichnet man nun den Weg, welchen ein von dem Spiegel reflektierter Lichtpunkt beim Durchlaufen eines magnetischen Kreisprozesses auf einem dem Spiegel gegenüber stehenden Papier zurücklegt, mit der Hand oder photographisch auf, so erhält man offenbar direkt das Bild einer hysteretischen Schleife. Ist es notwendig, so kann auch der Koordinatenmassstab auf absolutes Mass reduziert werden. Die infolge des magnetischen Widerstandes des Joches, der Polschuhe und des Schlitzes notwendige Scheerung kann mit Hilfe eines von Ewing angegebenen kinematischen Kunstgriffes automatisch erfolgen. Im allgemeinen wird sich dieser für Demonstrationszwecke ausgezeichnete Apparat nur für rohere Messungen eignen.

§ 28. Zugkraftmethoden.

1. *Magnetische Wage von du Bois.*

Die bereits bei Erwähnung der *Tragkraftsmethode* zur Untersuchung permanenter Magnete angedeuteten Uebelstände [1]) haften fast allen Methoden an, bei welchen die magnetische Zugkraft zur Vergleichung und Bestimmung der magnetischen Eigenschaften benutzt wird, z. B. dem *Permeameter* von Thompson [2]). Herrn du Bois gebührt das Verdienst, in seiner *magnetischen Wage* [3]) einen Apparat geschaffen zu haben, bei welchem die gerügten Uebelstände vermieden sind. Da

1) Dieselben sind eingehend besprochen in du Bois, »Magnetische Kreise u. s. w.«, § 107, p. 169.

2) Silv. Thompson, »Dynamoelektrische Maschinen«. Deutsche Ausgabe. 4. Aufl., p. 126, Halle a. S. 1893.

3) du Bois, »Eine magnetische Wage und deren Gebrauch«, Zeitschrift für Instrumentenkunde 12, p. 404, 1892; Elektrotechn. Zeitschrift 13, p. 579, 1892; vergl. auch du Bois, »Magnetische Kreise« u. s. w., sowie Ewing, »Magnetische Induktion«.

auch dieser Apparat für technische Untersuchungen von besonderer Bedeutung ist, so soll derselbe etwas eingehender besprochen werden. Der Apparat ist in der älteren Form[1]) in Fig. 21 perspektivisch und in Fig. 22 schematisch dargestellt.

Während bei allen sonst üblichen Zugkraftmethoden ferromagnetische Teile direkt sich berühren, ist dies bei der magnetischen Wage vollständig vermieden. Es findet

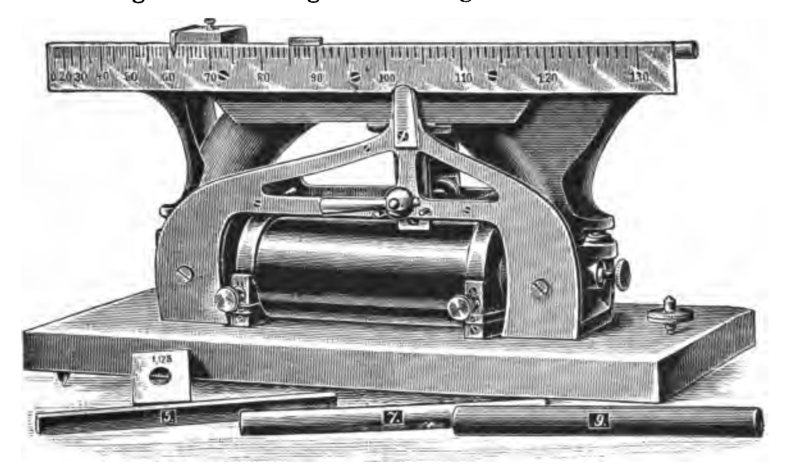


Fig. 21.

bei diesem Apparate nur ein Abreissen einer mit konischem Ende versehenen Schraube I (Fig. 22) aus fast unmagnetischem und doch genügend hartem Material (Manganstahl) von einer ebenen Fläche statt.

Die Wage besteht, wie aus Fig. 22 zu ersehen ist, aus zwei auf einem Grundbrett befestigten Backen aus

1) Herr du Bois ist augenblicklich damit beschäftigt, noch einige Verbesserungen an seinem Apparat anzubringen. Es wird daher in nächster Zeit eine neue Form der Wage in den Handel gebracht werden (durch die Firma Siemens & Halske). Vergl. Verhandlungen der Physikalischen Gesellschaft zu Berlin 17, p. 97, 1898.

weichem Eisen, V_1 und V_2, über welchen, excentrisch auf der Schneide E gelagert, ein Eisenjoch YY, welches gleichzeitig als Wagebalken dient, mit geringem Spielraum (die Weite der Luftschlitze bei J und A beträgt bei der neuen Form der Wage nur etwa 0,25 mm) sich bewegt. Das Gleichgewicht ist durch einen Bleiklotz P hergestellt. Der zu untersuchende Stab T[1]), welcher von der Magnetisierungsspule C umgeben ist, wird zwischen die Backen V_1 und V_2 mit möglichst eben abgeschliffenen

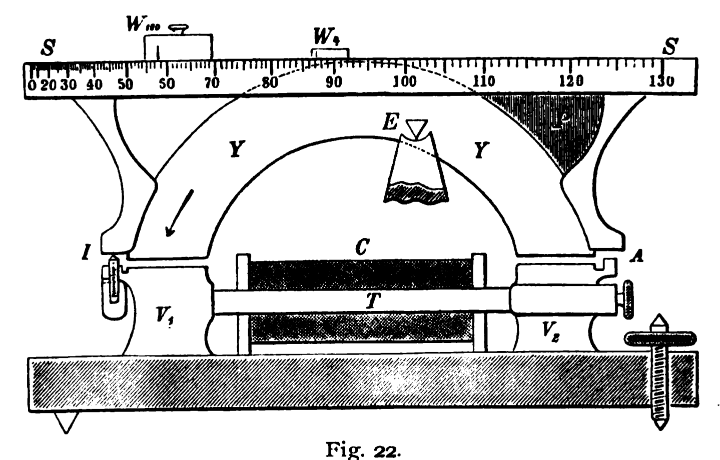


Fig. 22.

Endflächen eingelegt und automatisch durch die magnetische Anziehungskraft festgehalten. Bei der neuen Form der Wage ist es auch möglich, den Stab in gleicher Weise wie bei der Jochmethode oder dem Koepselschen

1) Bei der älteren Form der Wage muss der Stab bei einer Länge von 15 cm einen Querschnitt von 1 qcm haben, was einem Durchmesser von 1,128 cm entspricht. Bei der neuen Form wird der Querschnitt der Stäbe, welche 33 cm lang sind, nur 0,5 qcm betragen (0,798 cm Durchmesser bei kreisrundem, 0,707 cm Kantenlänge bei quadratischem Profil). Hierdurch wird das Verhältnis des Stabquerschnittes zum Querschnitt des Joches günstiger, wodurch sich dann auch die Scheerung verringert.

Apparat mittels eiserner Backen in Ausbohrungen der Endstücke V_1 und V_2 festzuklemmen.

Wird nun der Stab T durch den Strom in der Spule C magnetisiert, so erzeugen die auf beiden Seiten aus Symmetriegründen gleichen magnetischen Anziehungen dennoch der ungleichen Hebelarme wegen verschiedene Kräftepaare. Als Resultante ergiebt sich ein Drehungsmoment, welches, wie besondere ballistische Versuche von Herrn du Bois bestätigt haben, innerhalb des zu benutzenden Bereiches dem Quadrat des Induktionsflusses in der Mitte des Probestabes proportional ist. Dieses Drehungsmoment zieht den Wagebalken auf der linken Seite (über V_1) herunter. Eine vollständige Berührung des Joches YY mit der Backe V_1 wird indessen verhindert durch die Anschlagschraube J. Zur Aufhebung der magnetischen Anziehungskraft dienen Laufgewichte W_{100} und W_4, die sich auf einer quadratisch geteilten Skala SS, welche an dem Wagebalken befestig ist, verschieben lassen. Da das Gleichgewicht des Wagebalkens stets ein labiles ist, so muss man nach dem Gefühl die Einstellung des Laufgewichtes finden, bei welcher der Wagebalken gerade von der Schraube J abreisst. Dies wird nach kurzer Uebung[1]) keine grossen Schwierigkeiten bereiten.

Das Instrument ist so justiert, dass man aus der Skalenablesung durch Multiplikation mit 10 ($\sqrt{100}$) bezw. 2 ($\sqrt{4}$), je nachdem man das 100 g oder das 4 g schwere Laufgewicht benutzt hat, unmittelbar den Wert der

---

1) Es ist vorteilhaft, bei dem Verschieben des Laufgewichtes zuerst derart zu verfahren, dass man zwei Stellungen aufsucht, in deren einer der Wagebalken noch gerade fest auf der Anschlagschraube ruht, und in deren anderer der Wagebalken bereits losgerissen ist. Man erreicht es durch geringe Uebung, dass diese beiden Grenzen bald vollständig zusammenfallen. Im anderen Falle nimmt man den Mittelwert zwischen den beiden Grenzen.

Magnetisierungsintensität $\mathfrak{J}$ erhält. Bei der neuen Form der Wage soll die Skala derart geteilt werden, dass sich hierbei die Grösse der Induktion $\mathfrak{B}$ ergiebt. Diese Berechnung gilt für den vorgeschriebenen Querschnitt von 1 qcm oder bei der neuen Form von 0,5 qcm. Werden Probestücke von grösserem oder kleinerem Querschnitt verwendet, so müssen die gefundenen Werte von $\mathfrak{J}$ bezw. $\mathfrak{B}$ noch durch den Querschnitt dividiert werden. Es ist im übrigen nach den Untersuchungen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt[1]) notwendig, falls man nicht erheblich abweichende Werte erhalten will, möglichst den vorgeschriebenen Querschnitt[2]) zu benutzen (eine Abweichung von ungefähr 10 % von diesem Werte ist, wenigstens bei der bereits eingehend untersuchten älteren Form der Wage, noch zulässig). Die Feldintensität $\mathfrak{H}$ ergiebt sich bei der älteren Form der Wage durch Multiplikation der Stromstärke (in Ampere) mit 10, bei der neueren Form durch Multiplikation mit 100.

Infolge des magnetischen Widerstandes des Joches, der Luftschlitze und der Fugen zwischen dem Stab und den Backen ist eine Scheerung der Kurven, wenigstens bei absoluten Bestimmungen erforderlich. Die Scheerungskurven werden mit Hilfe eines Normalprüfstabes gewonnen und jeder Wage beigefügt. Gleichzeitig wird bei der Prüfung der Wage, welche bei der älteren Form in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vorgenommen wurde, die Schraube J derart durch eine plombierte Hülse gesichert, dass ein Verstellen derselben und hier-

---

1) A. Ebeling und Erich Schmidt, »Untersuchungen über die du Boissche magnetische Wage«, Zeitschrift für Instrumentenkunde 16, p. 353, 1896. Elektrotechnische Zeitschr. 18, p. 208, 1897.

2) Zur Innehaltung des richtigen Querschnitts wird für cylindrische Stäbe jeder Wage eine Lehre beigegeben.

mit eine Veränderung der Weite der Luftschlitze und der Angaben der Wage ausgeschlossen ist.

Die eingehende Untersuchung der älteren Form der Wage in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt hat ergeben, dass die bei absoluten Messungen zu berücksichtigende Scheerung, wie bereits bei allen bisher besprochenen Methoden, für verschiedene Materialien verschieden ausfällt. Auch hier können jedoch für praktische Zwecke die Unterschiede in der Scheerung vernachlässigt werden. Bei der neuen Form des Apparates wird voraussichtlich der günstigeren Dimensionsverhältnisse wegen und infolge einiger anderen Verbesserungen die Scheerung ganz bedeutend geringer werden, so dass es jedenfalls möglich ist, auch bei der Wage nicht nur bei relativen Bestimmungen, sondern auch bei absoluten Messungen wenigstens für technische Zwecke die Scheerung nicht zu berücksichtigen.

Die magnetische Wage bietet ebenfalls ein Beispiel dafür, dass äussere magnetische Einflüsse unter Umständen verschiedene Ablesungen für positive und negative Werte der Induktion hervorrufen können. Diese Ungleichseitigkeit der Ablesungen bei der älteren Form der Wage, welche von Herrn F. Kohlrausch auf den Einfluss der vertikalen Komponente des Erdfeldes zurückgeführt worden ist[1]), wird bei der neueren Form durch einen auf der Mittellinie der Wage parallel verschiebbaren vertikalen Kompensationsmagneten (Stricknadel) aufgehoben.

Als Nebenapparate für die Wage sind nur eine Batterie, ein Regulierwiderstand und ein Strommesser erforderlich, welche in Verbindung mit einem Schlüssel und einem Umschalter in den Magnetisierungsstromkreis

1) A. Ebeling und Erich Schmidt, »Untersuchungen über die du Boissche magnetische Wage«, p. 354.

eingeschaltet werden. Da ausserdem fast jegliche Rechnung unnötig ist, so bietet dieser Apparat ein sehr bequemes Hilfsmittel, die magnetischen Eigenschaften der Materialien zu bestimmen.

2. Magnetische Wage von Ewing.

Neuerdings ist auch von Herrn Ewing eine *magnetische Wage*[1]) konstruiert worden. Dieselbe liefert indessen nur für eine bestimmte Feldintensität ($\mathfrak{H} = 20$ C. G. S.-Einheiten) den Wert der zugehörigen Induktion $\mathfrak{B}$. Der Apparat ist daher nur verwendbar für angenäherte relative Bestimmungen.

§ 29. Verschiedene Methoden.

Es würde den Rahmen dieses Buches überschreiten, wenn alle Methoden zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften des Eisens besprochen werden sollten. Ein Teil derselben hat nur für genauere wissenschaftliche Untersuchungen Bedeutung (Isthmusmethode, magnetooptische Methode und andere), ein anderer Teil giebt selbst für technische Messungen nicht genügend genaue Resultate. Indessen soll in diesem Paragraphen noch eine Anzahl von Methoden kurze Erwähnung finden, welche allerdings hinter den bisher beschriebenen Methoden und Apparaten meistenteils zurückstehen, aber doch für technische Kreise vielleicht einiges Interesse haben.

1. Benutzung des Widerstandes einer Wismutspirale.

Bringt man einen metallischen Stromleiter in ein magnetisches Feld, so ändert sich im allgemeinen der Widerstand des Stromleiters. Besonders auffällig ist diese Erscheinung, wie Righi zuerst gezeigt hat, beim Wismut.

---

1) »Ewings magnetische Wage für den Gebrauch in der Werkstatt«. Elektrotechnische Zeitschrift 19, p. 325, 1898.

Leduc schlug daher zur Messung magnetischer Felder die Benutzung von Wismutdraht vor. Besonders aber ist es Lenard und Howard zu verdanken, dass auf diese Erscheinung eine brauchbare Messmethode gegründet wurde[1]. Diese Messmethode liegt auch einem magnetischen Untersuchungsapparat von Bruger[2]) zu Grunde, welcher in Fig. 23 in Verbindung mit der gesamten Magnetisierungsschaltung dargestellt ist. Der Probestab, welcher sich in der Spule *e* befindet, liegt hierbei derart zwischen den Enden eines Schlussjoches, dass auf der einen Seite noch ein Luftschlitz frei bleibt, innerhalb dessen mit einer *Wismutspirale* die Feldintensität gemessen wird.

2. Benutzung des Prinzips der Wheatstoneschen Brücke.

Bei der Bestimmung elektrischer Widerstände bedient man sich in den meisten Fällen einer Anordnung, welche in Fig. 24 schematisch dargestellt ist und mit dem Namen der *Wheatstoneschen Brücke* bezeichnet wird. Hierbei ist X der zu messende Widerstand, N ein Normalvergleichswiderstand und W_1 und W_2 zwei bekannte Widerstände, welche entweder gleich sind oder in einem einfachen Zahlenverhältnis (1 : 10 oder dergleichen) zu einander stehen. Bei G ist ein Galvanometer und bei B eine Batterie eingeschaltet. Sind nun die Widerstände so abgeglichen, dass $\frac{X}{N} = \frac{W_2}{W_1}$ ist, so bleibt der Zweig, in welchem sich G befindet, stromlos, und man erhält keinen Ausschlag im Galvanometer.

---

1) Leduc, Journal de physique [2] 5, p. 116, 1886, und 6, p. 189, 1887; Lenard und Howard, Elektrotechnische Zeitschrift 9, p. 340, 1888; Lenard, Wied. Ann. 39, p. 619, 1890.

2) Der Apparat wird von der Firma Hartmann & Braun in Frankfurt a. M.-Bockenheim hergestellt. Vergl. auch Elektrotechn. Zeitschr. 15, p. 469, 1894.



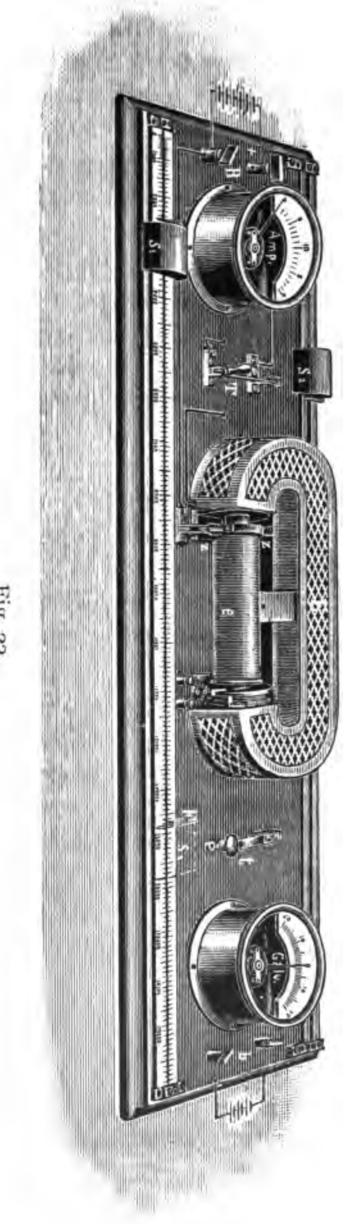


Fig. 23.

Man kann dieses Prinzip mit einer gewissen Annäherung auch auf magnetische Verhältnisse übertragen. Dies ist z. B. in dem Apparat von Kennelly[1]) geschehen, welcher in Fig. 25 schematisch dargestellt ist. Derselbe ermöglicht die ungefähre Abgleichung der magnetischen Widerstände zweier Eisenproben. Es besteht der Apparat aus einem ┗┻┛-förmigen Eisenjoch, dessen untere Schenkel von Magnetisierungsspulen umgeben sind. Bei AF wird der zu untersuchende Stab, bei FC werden Normalprobestäbe aufgelegt. Sind dann die magnetischen Widerstände abgeglichen, so tritt in dem mittleren Eisenquerstück FD eine Induktion nicht mehr auf. Dies erkennt man an der Unbeweglichkeit einer in radialer Richtung vom Strom durchflossenen Kupferscheibe D, welche

1) Kennelly, Elektrotechnische Zeitschr. 14, p. 727, 1893.

in einem passenden Schlitze um die unifilare stromführende Aufhängung *OP* drehbar angebracht ist.

In ähnlicher Weise vergleicht auch Ewing in seiner *Permeabilitätsbrücke* [1]) den Prüfstab mit einem Normalstab. Hierbei ist der dem Galvanometerzweige in der Wheatstoneschen Brücke entsprechende Zweig von einem Eisenbügel gebildet, der von den eisernen Endverbindungsstücken der beiden zu vergleichenden Stäbe ausgeht. Dieser Zweig schliesst eine horizontal bewegliche Magnetnadel ein, deren Achse in der Nullstellung senkrecht zu dem Bügel steht. Die Abgleichung der magnetischen Widerstände erkennt man daran, dass die Nadel in ihrer Nulllage verbleibt.

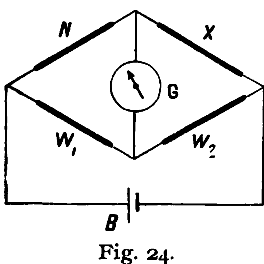


Fig. 24.

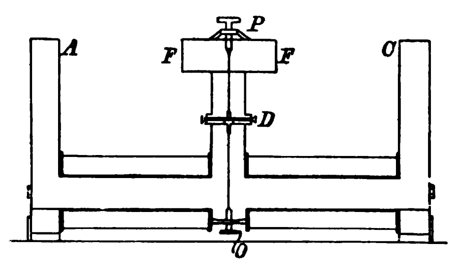


Fig. 25.

3. Apparate zur Messung der Hysteresis.

Von Ewing ist vor einigen Jahren ein Apparat [2]) konstruiert worden, welcher gestattet, direkt den Hyste-

---

1) Ewing, »Permeability bridge«, Electrician 37, 6. 41, London 1896.

1) Ewing, »Magnetischer Apparat zur Untersuchung von Blechen für Transformatoren«. Elektrotechnische Zeitschrift 16, p. 292, 1895.

resisverlust von Transformatorblechen bei einem bestimmten Werte der Induktion zu messen. Diesem Apparat, welcher in Fig. 26 schematisch dargestellt ist, liegt der Gedanke zu Grunde, die Arbeit zu bestimmen, welche durch Umkehrung des Magnetismus in den zu untersuchenden Blechproben verbraucht wird. Das Ver-

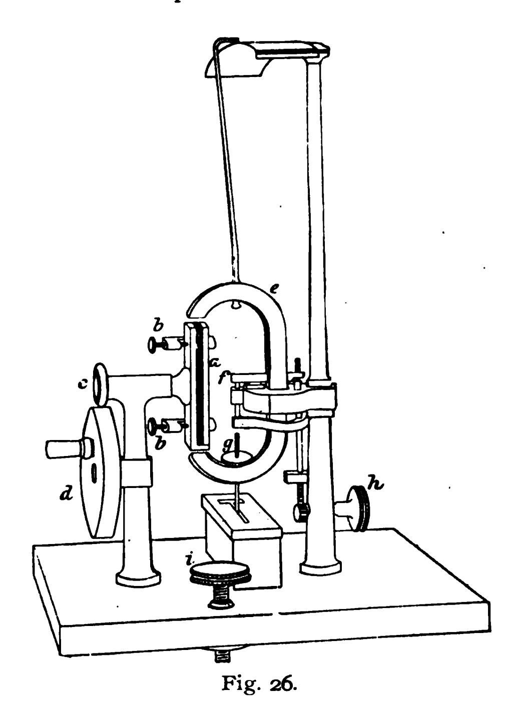


Fig. 26.

fahren hierbei ist folgendes. Die zu untersuchende Blechprobe wird in Form eines Bündels, dem durch eine Lehre die vorgeschriebenen Dimensionen erteilt sind, bei *a* eingesetzt und mittels der Klemmen *b* festgehalten. Mit Hilfe des Triebrades *d* und der Friktionsrolle *c* wird das Bündel in Rotation versetzt. Hierbei dreht es sich zwischen den Polen eines starken permanenten Magneten *e*, welcher mit den Schneiden *f* aufliegt und

einen Zeiger trägt. In dem Blechbündel wird hierdurch die Magnetisierung beständig umgekehrt. Die mechanische Arbeit, welche hierbei infolge der Hysteresis verbraucht wird, erzeugt ein Drehungsmoment, welches den Magneten aus seiner Ruhelage ablenkt. Die Grösse der Ablenkung bei den zu prüfenden Blechen wird verglichen mit derjenigen von beigefügten Probebündeln, für welche die auf ballistischem Wege bestimmte Hysteresis bekannt ist. Der Apparat ist leicht zu bedienen, liefert indessen nur relative Werte und ist vor allem nur innerhalb eines gewissen Bereiches der Induktion (etwa 4000 C. G. S.-Einheiten) zu benutzen.

Auf dem gleichen Prinzip wie der Ewingsche Apparat beruht ein Hysteresismesser von Blondel und Carpentier[1]). Indessen wird bei diesem nicht das Blechbündel, sondern der Magnet gedreht. Das Blechbündel befindet sich in Form eines Ringes zwischen den Polen des Magneten. Statt eines permanenten Magneten kann bei diesem Apparat auch ein Elektromagnet verwendet werden, so dass es möglich ist, bei verschiedenen Werten der Induktion zu beobachten.

Alle besprochenen Messmethoden sind (mit Ausnahme des Hysteresismessers) *magnetostatische* Methoden. Auf *magnetodynamische* Methoden, bei welchen direkt die beim Durchlaufen magnetischer Kreisprozesse in einem Transformator verbrauchte Energie mittels eines Wattmeters gemessen wird, soll hier nicht eingegangen werden, einerseits, weil die Genauigkeit der mit denselben erhaltenen Werte noch nicht genügend geprüft ist, anderseits, weil sie für den Hütteningenieur wohl nicht in Betracht kommen.

---

1) »Der Hysterismesser Blondel-Carpentier«, Elektrotechn. Zeitschrift 20, p. 178, 1899.

III. Magnetische Eigenschaften des Eisens und verwandter Metalle.

---

§ 30. Einleitung.

Untersucht man das magnetische Verhalten der verschiedenen Metalle, so sind es vor allem drei derselben, welche ganz besondere Eigenschaften aufweisen, und zwar *Eisen*, *Nickel* und *Kobalt*. Diese drei Elemente und mehr oder weniger auch ihre Verbindungen und Legierungen nehmen besonders leicht den Magnetismus an und können ihn unter gewissen Bedingungen dauernd behalten. Man bezeichnet daher dieselben als die *magnetische Gruppe* der Elemente. Bei weitem im Vordergrunde des Interesses, besonders für die Technik, steht unter diesen drei Metallen das *Eisen*.

Den in der Praxis verwendeten Eisensorten sind mehr oder weniger geringe Quantitäten anderer chemischen Elemente beigemengt. Diese fremden, bei den einzelnen Eisensorten dem Prozentgehalt nach verschiedenen Bestandteile haben bekanntlich auf die Festigkeit und Elasticität des Eisens grossen Einfluss. Wir werden sehen, dass in gleicher Weise auch das magnetische Verhalten mit dem Gehalt an fremden Stoffen sich ändert. Indessen ist ausser der chemischen Zusammensetzung einer Eisensorte auch die Herstellungsart und mechanische Behandlung derselben für die magnetischen Eigenschaften des betreffenden Eisens von der allergrössten Bedeutung.

Es ist das Bestreben aller beteiligten Kreise darauf gerichtet, zwischen der chemischen Zusammensetzung und der mechanischen Behandlung einerseits und dem magnetischen Verhalten anderseits eine Gesetzmässigkeit herauszufinden. Wie weit dies bisher gelungen ist, lässt sich aus den folgenden Paragraphen ersehen, in welchen auf die magnetischen Eigenschaften der verschiedenen Eisensorten sowie der verwandten Metalle und insbesondere auf den Zusammenhang mit der chemischen Zusammensetzung und der mechanischen Behandlung näher eingegangen werden soll.

§ 31. Ungleichmässigkeit der Eisenmaterialien.

Bei den Versuchen, welche für das Erreichen des soeben angegebenen Ziels notwendig sind, stellt sich eine Schwierigkeit ganz besonders hemmend in den Weg. Entnimmt man nämlich zur magnetischen Untersuchung eines grösseren Eisenblocks demselben an zwei verschiedenen Stellen Probestücke, so zeigen die beiden Proben oft ein ganz verschiedenes magnetisches Verhalten. Diese *magnetische Ungleichmässigkeit* des Materials ist wohl grösstenteils dadurch bedingt, dass einerseits der Prozentgehalt der chemischen Beimengungen nicht an allen Stellen des Blockes gleich ist, anderseits das Material eine ungleichmässige mechanische Behandlung (beim Giessen, Walzen, Glühen oder dergl.) erfahren hat. Die Ungleichmässigkeiten zu verbessern oder überhaupt zu vermeiden, muss das Streben der Eisenhüttenwerke sein, damit es möglich ist, aus dem magnetischen Verhalten einer einzigen Probe, welche einer beliebigen Stelle eines grösseren Eisenblockes entnommen ist, sofort die magnetischen Eigenschaften des ganzen Stücks zu erkennen.

Um die Inhomogenität magnetischer Materialien näher zu prüfen und zugleich ein Mittel zur Beseitigung derselben zu finden, wurden in der Physikalisch-Tech-

nischen Reichsanstalt eingehendere Versuche [1]) angestellt. Es gelangten hierbei eine grössere Anzahl von Stäben, teils ungeglüht, teils im offenen Holzkohlenfeuer geglüht, aus *Schmiedeeisen, Walzeisen, Stahl, Gusseisen und Stahlguss* [2]) zur Untersuchung. Die verschiedenen Materialien wurden hierbei nach der Jochmethode in Form von Stäben, welche länger als das Schlussjoch waren, an drei verschiedenen Stellen ballistisch geprüft. Bei diesen Versuchen fand man eine Reihe von Stäben, die verhältnismässig wenig ungleichartig waren, andere zeigten bedeutende Unregelmässigkeiten.

Als ein Beispiel von besonders starker magnetischer Inhomogenität seien in Fig. 27 für einen Stab aus bestem weichen schwedischen Schmiedeeisen die an den drei verschiedenen Stellen gewonnenen Induktionskurven [3]) wiedergegeben; hierbei entsprechen die ausgezogenen, gestrichelten und strichpunktierten Kurven je einer der drei untersuchten Stellen. Dieser Stab war aus einem Material hergestellt, welches in einzelnen Stücken von ganz hervorragender magnetischer Güte war.

Im Gegensatz hierzu zeigte es sich, dass die neueren gegossenen Materialien am gleichmässigsten [4]) sind. Dies

1) A. Ebeling und Erich Schmidt, »Ueber magnetische Ungleichmässigkeit und das Ausglühen von Eisen und Stahl«, Zeitschrift für Instrumentenkunde 16, p. 77—87, 1896, Wied. Ann. 58, p. 330—341, 1896.

2) Es wird von den Hüttenwerken in neuerer Zeit nach englischem Muster das schmiedbare Flusseisen oft als Stahlguss bezeichnet. Da indessen nur das Eisen als Stahl bezeichnet werden kann, welches härtbar ist, also etwa 0,5 bis 2 % Kohlenstoff enthält, so ist die Bezeichnung Stahlguss besser durch Flusseisen zu ersetzen.

3) Es ist, wie auch bei allen folgenden Induktionskurven, nur die Hälfte der vollen Schleife gezeichnet, da die auf der negativen Seite verlaufende Hälfte der gezeichneten kongruent ist.

4) Dies ist erklärlich nach einer Arbeit von Herrn West, wonach selbst in einer Gussstange von etwa 2 m Länge aus Guss-

bestätigte sich auch bei den zur Prüfung eingesandten Stäben. Um bei diesen in einfacher und schneller Weise ein Urteil über die magnetische Homogenität bezw. Inhomogenität zu erlangen, wurde die Aenderung der elektrischen Leitungsfähigkeit längs des Prüfstabes

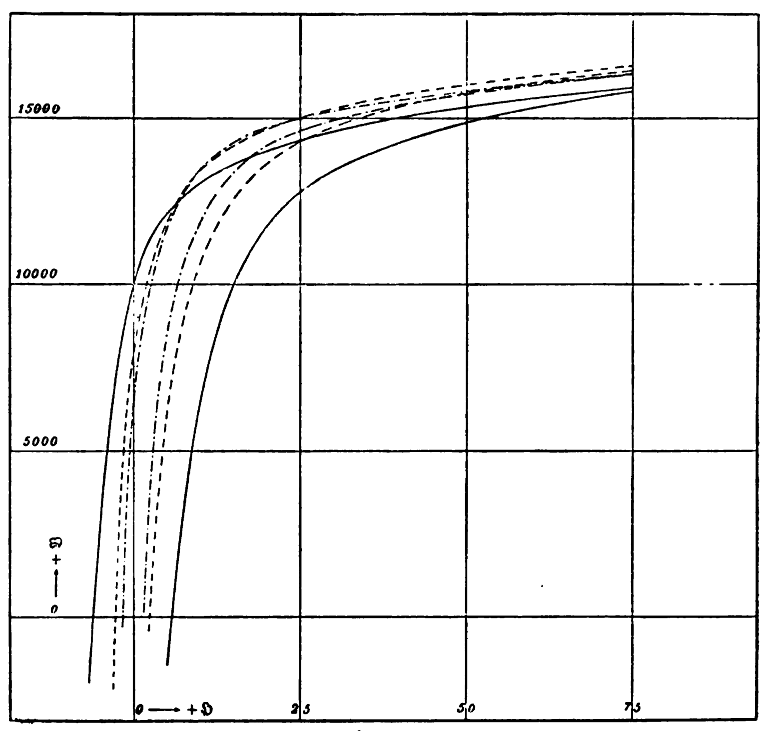


Fig. 27.

bestimmt. Durch Versuche war nämlich festgestellt worden, dass diejenigen Eisen- und Stahlstäbe, welche geringe Unterschiede in den Werten der elektrischen Leitungsfähigkeit zeigen, auch geringe magnetische

eisen nur sehr geringe Unterschiede im spezifischen Gewicht und in der chemischen Zusammensetzung gefunden wurden. Vergl. Zeitschr. d. Vereins deutscher Ingenieure 39, p. 1406, 1895.

Inhomogenitäten besitzen[1]). So erweisen sich Materialien, für welche die Differenzen in den Werten der elektrischen Leitungsfähigkeit bis zu etwa 1 % gehen, auch stets als magnetisch recht homogen.

Von 69 Proben aus Stahlguss, Siemens-Martin-Stahl und Flusseisen zeigten Unterschiede in der elektrischen Leitungsfähigkeit

41	Stück	bis zu 1 %,
20	„	von 1 bis 2 „
3	„	„ 2 „ 3 „
4	„	„ 3 „ 5 „
1	„	„ 10 „

Man ersieht also auch aus diesen Angaben die grosse Gleichmässigkeit der gegossenen Materialien.

Es liegt nahe den Versuch zu machen, die magnetischen Inhomogenitäten eines Materials durch Ausglühen zu beseitigen. Hierbei zeigt sich, dass die Art des Ausglühens von Einfluss ist, und zwar derart, dass ein magnetisch homogenes Material durch schlechtes und ungleichmässiges Ausglühen auch verschlechtert werden kann. So wies bei den Versuchen in der Reichsanstalt z. B. ein recht gleichmässiger Stab aus Stahlguss, welcher derart ausgeglüht wurde, dass das eine Ende eine Temperatur von etwa 1000 Grad C. erreichte, während das andere Ende gar nicht zum Glühen kam, nach dem Versuch sehr starke Unterschiede in den Kurven auf. Auch Transformatorenbleche, welche ja gewöhnlich in grossen Packeten ausgeglüht werden, zeigen sehr häufig nach dem Ausglühen starke magnetische Inhomogenitäten. Vielfach ergiebt sich hierbei, dass die Randstücke bessere magnetische Eigenschaften zeigen, als die Mitte der

1) A. Ebeling, »Prüfung der magnetischen Homogenität von Eisen- und Stahlstäben mittels der elektrischen Leitungsfähigkeit«, Zeitschrift für Instrumentenkunde 16, p. 87, 1896; Wied. Ann. 58, p. 342, 1896.

Bleche[1]). Dies findet wohl am besten darin seine Erklärung, dass der Rand bei dem Ausglühen gründlicher durchgeglüht wird.

Hiernach ist bei jedem Ausglühen zu beachten, dass alle Teile eines auszuglühenden Stückes stets gleichen Temperaturen auszusetzen sind. Ausserdem muss aber auch, wie wir später noch sehen werden, die Dauer des Ausglühens eine genügend lange, und die Abkühlung eine ganz allmähliche sein.

Um eine gleichmässige Temperaturverteilung und einen möglichst langsamen Temperaturabfall bei den in der Reichsanstalt angestellten Ausglühversuchen zu erreichen, wurden die definitiven Versuche in einem grossen Ofen der Königlichen Porzellanmanufaktur angestellt.

Die Temperaturverhältnisse in dem Ofen wurden mittels eines Le Chatelierschen Thermoelementes aus Platin und Platinrhodium nach der von den Herren Holborn und Wien in der Reichsanstalt ausgearbeiteten Methode bestimmt. Hierbei zeigte sich, dass selbst in geringem Abstande von der inneren Wand des Ofens auch bei 1000 Grad C. keine Temperaturunterschiede mehr nachweisbar waren. Auch der Temperaturabfall war ein sehr langsamer und gleichmässiger, wie es sich aus Fig. 28 ersehen lässt, welche den Temperaturverlauf in dem Ofen während des Ausglühens darstellt.

Das Ausglühen muss stets so erfolgen, dass das Eisen gegen die direkte Einwirkung der Flammengase geschützt ist. Die im Ofen der Porzellanmanufaktur ausgeglühten Stäbe lagen daher in einem Porzellanrohr, welches zum Schutz gegen Beschädigungen noch von einem Thonrohr umgeben war. Zur Beschränkung der oxydierenden Wirkung der Luft wurde vor den Stab

1) Vergl. W. Röhr, »Untersuchungen von Eisenblechen«, Elektrotechn. Zeitschrift 19, p. 712, 1898.

noch ein beliebiges Stück Eisen gelegt. Neuerdings werden statt dessen Eisenspäne verwendet. Hierdurch wird erreicht, dass die Oxydschicht meistens nicht mehr als 0,001 mm beträgt.

Bei den Glühversuchen ergab sich, dass ein magnetisch inhomogener Stab aus Schmiedeeisen selbst nach zweimaligem Ausglühen nur unwesentlich gleichmässiger

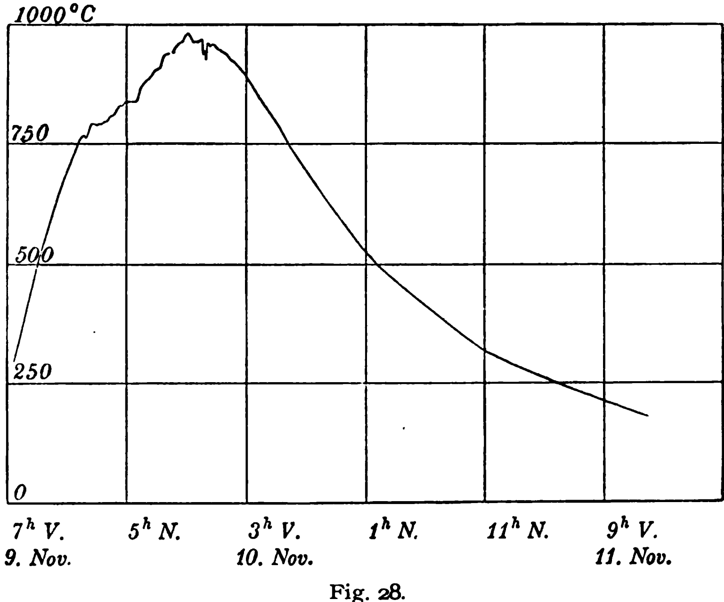


Fig. 28.

geworden war, während ein vorher ziemlich inhomogener Stahlstab sich beim Glühen beträchtlich verbessert hatte. Auch sind später bei Stahlgussstäben auf diese Weise magnetische Inhomogenitäten teilweise vollständig beseitigt worden.

Das Gesamtresultat der Untersuchungen über magnetische Inhomogenität und über die Art, dieselbe zu vermeiden oder zu beseitigen, lässt sich in folgenden Sätzen kurz zusammenfassen:

1. Das gleichmässigste Material liefert am wahrscheinlichsten ein sorgfältig überwachter Guss.

2. Gleichmässiges Ausglühen und darauf folgende langsame Abkühlung ist vorteilhaft.

3. Es ist bisher nicht gelungen, durch Ausglühen ein jedes Material vollständig magnetisch homogen zu machen.

§ 32. Magnetisch weiches und magnetisch hartes Material.

Man kann die verschiedenen Eisen- und Stahlsorten ihren magnetischen Eigenschaften nach in zwei Hauptgruppen trennen, welche ganz charakteristische Unterscheidungsmerkmale aufweisen, und zwar in *magnetisch weiche* und *magnetisch harte* Materialien.

Magnetisch weich nennt man ein Eisen, wenn es den Magnetismus einerseits leicht annimmt, also bereits bei geringen Feldstärken ein hohes Maximum der Permeabilität (bei den besten Sorten oft mehr als 4000 C. G. S.-Einheiten) zeigt, anderseits aber seinen magnetischen Zustand leicht verliert, d. h. eine geringe Koërcitivkraft besitzt. Zu dieser Gruppe sind *Schweisseisen, Walzeisen* und die neueren Sorten gegossenen Materials, wie *Stahlguss, Flusseisen* u. a. zu rechnen. Diese Materialien eignen sich sämtlich mehr oder weniger gut zur Verwendung bei Dynamomaschinen und Transformatoren, sowie auch zu Kernen für Elektromagnete. Als Beispiel für das magnetische Verhalten dieser Gruppe sind in Fig. 29 die Induktionskurven einer Stahlgusssorte von mittlerer Güte dargestellt.

Magnetisch hart wird dagegen ein Material genannt, welches sich schwer magnetisieren lässt oder mit anderen Worten erst bei hohen Werten der Feldstärke das Maximum der Permeabilität (meist nicht mehr als

100 bis 300 C. G. S.-Einheiten) erreicht, den einmal angenommenen magnetischen Zustand aber nur sehr schwer verliert, also eine grosse Koërcitivkraft aufweist. Wegen dieser Eigenschaften eignen sich die in diese Gruppe gehörigen verschiedenen Sorten *gehärteten Stahls* vorzüglich zu permanenten Magneten. In Fig. 30 giebt die ausgezogene Kurve die Beziehung zwischen der Induk-

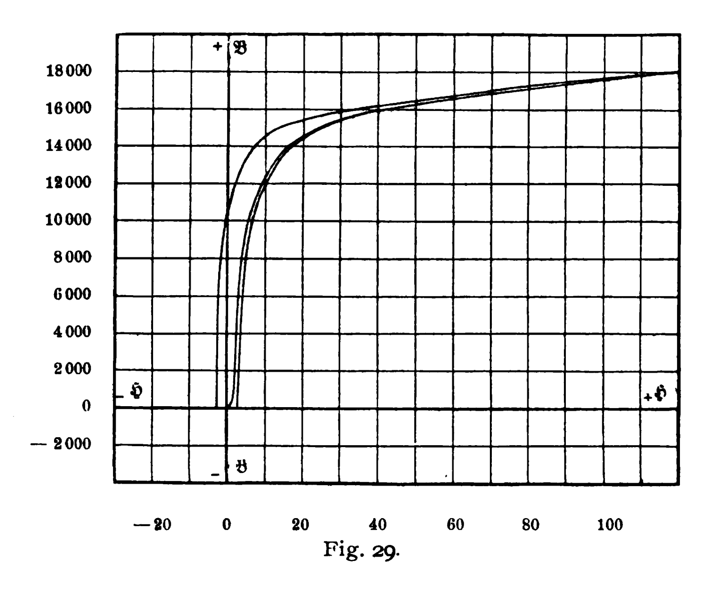


Fig. 29.

tion 𝔅 und der Feldstärke ℌ für eine Sorte gehärteten Stahls, während die gestrichelte Kurve die magnetischen Eigenschaften einer Stahlsorte im ungehärteten Zustande erkennen lässt.

Ein Material, welches in magnetischer Beziehung eine mittlere Stellung einnimmt, jedoch wohl mehr zur zweiten Gruppe gerechnet werden kann, ist das *Gusseisen.* Wie Fig. 30 zeigt, in welcher die punktierte Kurve das magnetische Verhalten einer Gusseisensorte darstellt, nähert sich die Form der Kurve sehr stark der Form der Stahlkurven.

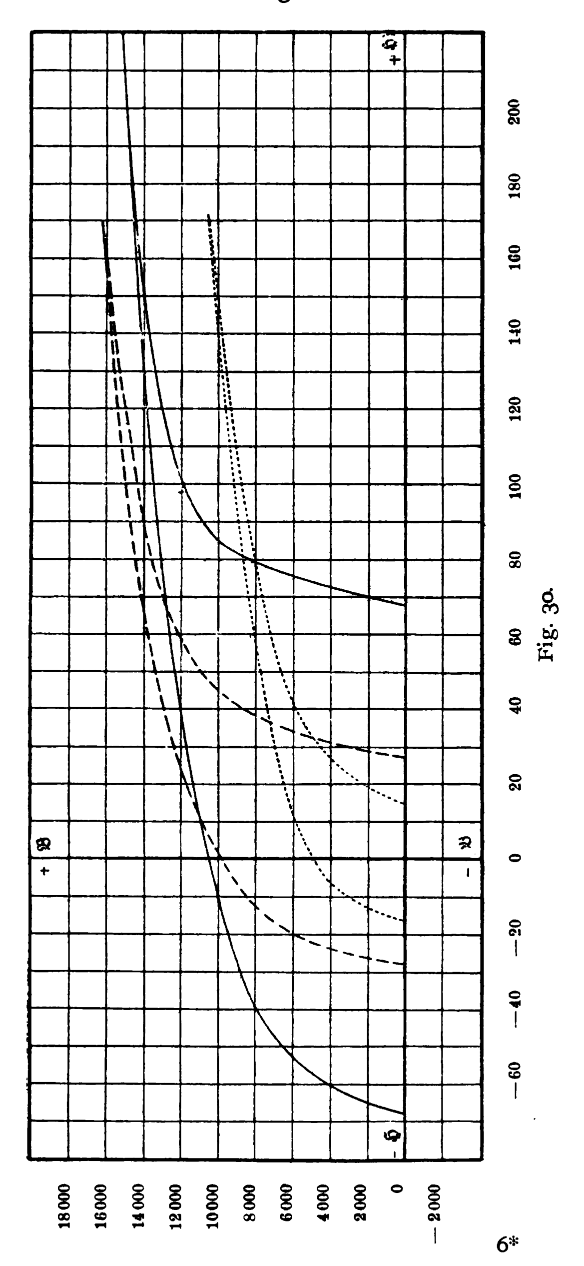

18000
16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
— 2000
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
—20
—40
—60

Fig. 30.

Welches sind nun die Ursachen, die ein derartig verschiedenes magnetisches Verhalten, wie es das weiche und das harte Material zeigt, hervorrufen? Am nächsten liegt es, hierbei an die Verschiedenheit der chemischen Zusammensetzung zu denken. Es ist eine bereits seit langem bekannte Thatsache, dass vor allem der verschiedene Gehalt an *Kohlenstoff* bei den magnetischen Eigenschaften des Eisens eine hervorragende Rolle spielt. So ist der Kohlenstoffgehalt des Schmiedeeisens und der neueren Stahlgusssorten sehr gering und beträgt im allgemeinen nur wenige Zehntel Prozent, während dagegen der für permanente Magnete bestimmte Stahl einen Kohlenstoffgehalt von etwa 0,5 bis 2 % besitzt. Hiernach scheint es auf den ersten Blick, als ob die magnetische Härte eines Materials nur von dem wachsenden Kohlenstoffgehalt abhängig wäre. Dies ist auch in gewissem Grade der Fall, doch zeigen genauere Untersuchungen, dass auch noch die anderen Beimengungen von Einfluss sind. So haben vor allen Dingen *Mangan* und *Silicium*, sowie der *Phosphor* oft eine ähnliche Wirkung wie der Kohlenstoff. Ausserdem ist zu beachten, dass auch der Kohlenstoff selbst in verschiedener Weise einwirkt, je nachdem er in *chemisch gebundener Form* oder nur als Beimengung in Gestalt von *Graphit* in dem Eisen vorhanden ist. Hierzu kommen noch einige Elemente, die besonders den zu permanenten Magneten verwendeten Stahlsorten zugesetzt werden, welche die Koërcitivkraft beträchtlich erhöhen. Dies sind in erster Linie *Chrom* und *Wolfram*.

Wenn nun auch stets eine gewisse Abhängigkeit des magnetischen Verhaltens der Eisensorten von ihrer chemischen Zusammensetzung gefunden, und bereits vielfach die Beobachtung gemacht worden ist, dass die Abwesenheit von Beimengungen ein Eisen magnetisch weicher macht, während bei dem Vorhandensein von

verschiedenen fremden Bestandteilen das Material im allgemeinen magnetisch härter wird, so ist doch anderseits bei allen diesbezüglichen Versuchen wiederholt festgestellt worden, dass nicht sowohl die chemische Zusammensetzung von ausschliesslichem Einfluss auf die magnetische Beschaffenheit ist, als vielmehr ganz besonders der durch die mechanische Behandlung bedingte physikalische Zustand des Materials.

Zahlreiche Versuche, welche von den verschiedensten Forschern angestellt wurden, haben gezeigt, dass alle *mechanischen Einflüsse,* welche mit einer Aenderung der molekularen Struktur des Materials verbunden sind, den magnetischen Zustand wesentlich verändern können. So wird Eisen durch Hämmern, Walzen, Ausziehen zu Draht oder durch irgend eine andere Beanspruchung über die Elasticitätsgrenze hinaus mechanisch gehärtet. Dass hierdurch die Permeabilität wesentlich geringer wird, während die Koërcitivkraft wächst, hat z. B. Ewing[1]) an einem weichen Eisendraht gezeigt, welcher durch Dehnung um 10 Proz. seiner ursprünglichen Länge mechanisch gehärtet war. Derselbe zeigte im gestreckten Zustande erst bei einer Feldstärke von etwa 11 Einheiten das Maximum der Permeabilität, welches 670 Einheiten betrug, während er im weichen Zustande das Maximum der Permeabilität von 3080 Einheiten bereits bei der Feldstärke 2,6 erreichte. Die Koërcitivkraft hatte sich durch die Dehnung von 1,7 auf 4,5 erhöht.

Ueber die beim Stahl durch Abschrecken vorgenommene Härtung soll später noch eingehender gesprochen werden. Hier sei nur erwähnt, dass auch bei dieser Härtung die Permeabilität erheblich abnimmt, während die Koërcitivkraft meistenteils auf mehr als das Doppelte anwächst.

---

1) Ewing, »Magnetische Induktion«, p. 81.

Während mechanische Einflüsse, welche über die Elasticitätsgrenze hinausgehen, ein weiches Material magnetisch verschlechtern, ist uns in dem *Ausglühen* ein Mittel gegeben, magnetisch minderwertiges Material (minderwertig, sobald es sich um die Verwendung bei Dynamomaschinen, Transformatoren oder Elektromagnetkernen handelt) zu verbessern. Wie bereits im vorigen Paragraphen gesagt war, ist ein möglichst gleichmässiges Ausglühen notwendig. Es hat sich aber ferner auch durch Versuche in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt herausgestellt, dass die Dauer und Häufigkeit des Ausglühens von bedeutendem Einfluss ist. Ueber die noch im Gange befindlichen Versuche soll nur gesagt werden, dass z. B. bei einem Stab aus Stahlguss, welcher bereits zum fünften Male in der in § 31 angegebenen Weise ausgeglüht wurde, die Weichheit des Materials mit dem jedesmaligen Ausglühen zugenommen hat. Anderseits wird man aber annehmen müssen, und dies hat sich zum Teil auch schon bestätigt, dass ein jedes Material bei diesem Ausglühen einen gewissen Grenzzustand erreicht, über welchen hinaus es nicht mehr verbessert werden kann.

Tabelle 2.

Material	Zustand	$\mathfrak{B}_{max}$	$\mathfrak{H}_{max}$	$\mathfrak{B}_{100}$	C	E	η
Schwedischer Stahlguss	ungeglüht	17 900	135	17 300	2,5	18 200	0,0029
Schwedischer Stahlguss	geglüht	18 080	126	17 600	1,0	9 750	0,0015
Deutscher Stahlguss	ungeglüht	17 780	130	17 240	2,3	21 000	0,0033
Deutscher Stahlguss	geglüht	18 430	162	17 440	1,2	11 200	0,0017

In welcher Weise das Ausglühen beim Stahlguss wirkt, lässt sich aus der vorstehenden Tabelle ersehen. In derselben bedeutet in C. G. S.-Einheiten:

$\mathfrak{B}_{max}$ die höchste beobachtete Induktion $\mathfrak{B}$ für die zugehörige höchste Feldstärke $\mathfrak{H}_{max}$,

$\mathfrak{B}_{100}$ den Wert von $\mathfrak{B}$ für $\mathfrak{H} = 100$,

C die Koërcitivkraft,

$E = \frac{1}{4\pi}\int \mathfrak{B}\, d\mathfrak{H}$ den Energieumsatz durch Hysteresis,

$\eta = \frac{E}{\mathfrak{B}_{max}^{1,6}}$ den Steinmetzschen Koëffizienten der magnetischen Hysteresis.

Dass auch die *Höhe der Temperatur* beim Ausglühen von Einfluss ist, lässt sich mit Sicherheit annehmen, doch sind hierüber noch keine genaueren Versuche angestellt worden. Wahrscheinlich aber wird im allgemeinen die Temperatur über dem Punkt liegen müssen, bei welchem das Material seinen magnetischen Zustand verliert und nicht mehr aufnahmefähig für den Magnetismus ist. Diese sogenannte *kritische Temperatur* ist bei den verschiedenen Eisensorten verschieden und liegt bei gewöhnlichem Eisen und Stahl etwa zwischen 700 und 900 Grad C.[1]).

Fasst man hiernach die Hauptpunkte zusammen, welche im allgemeinen bei der Herstellung magnetischer Materialien zu beachten sind, so ergiebt sich:

1. Alle mechanischen Einflüsse, welche die molekulare Struktur des Materials ändern, sind bei weichem Eisen nach Möglichkeit zu vermeiden.

2. Viele Sorten minderwertigen oder durch mechanische Einflüsse gehärteten Eisens lassen sich durch genügend langes Ausglühen verbessern. Die Dauer des Ausglühens ist natur-

1) Hopkinson, »Magnetic and other physical properties of iron at high temperature«. Phil. Trans. 1889 A., p. 443.

gemäss abhängig von der Grösse des auszuglühenden Stückes und der Art des Materials.

Die für ein bestimmtes magnetisches Verhalten beste *chemische Zusammensetzung* lässt sich nach dem jetzigen Stande der Untersuchungen noch nicht mit Sicherheit feststellen. Insoweit sich aber bei den einzelnen Eisensorten bereits gewisse Gesetzmässigkeiten ergeben haben, soll dies in den folgenden Paragraphen näher angegeben werden.

§ 33. Magnetisch weiches Material.

Wie bereits mehrfach hervorgehoben ist, tritt in neuerer Zeit das *Flusseisen,* welches oft als *Stahlguss, gegossener Siemens-Martinstahl* und ähnlich bezeichnet wird, bei weitem in den Vordergrund des Interesses. Den Hüttenwerken ist es zum Teil bereits gelungen, dies Material in seinen magnetischen Eigenschaften derart zu verbessern, dass es sich nur noch wenig von den besten Sorten des *Schmiedeeisens (Schweisseisens)* unterscheidet. Es ist infolgedessen bei einem Ueberblick über das magnetische Verhalten der weichen Materialien kaum möglich, das Schmiedeeisen von dem Flusseisen zu trennen; daher sollen auch im folgenden diese beiden Eisensorten gemeinschaftlich behandelt werden, und zwar zunächst in Bezug auf die Grösse der *Permeabilität* und die dadurch bedingte *Höhe der Magnetisierung.*

1. Permeabilität.

Tabelle 3 giebt eine Zusammenstellung der aus den Kommutierungskurven gewonnenen Induktionswerte einiger besseren *Stahlgusssorten* und gestattet einen Vergleich mit den entsprechenden, für *Schmiedeeisen, Walzeisen, Schmiedestahl* und eine Sorte fast völlig *reinen Eisens* erhaltenen Werten. Die Zahlen für die mit den Nummern 3, 4 und 7 bezeichneten Eisensorten sind einer Arbeit der Herren du Bois und Taylor

Tabelle 3.

ℌ	𝔅								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Reines Eisen	Low Moor-Eisen	Walzeisen		Englischer[1]) Schmiedestahl	Stahlguss Deutscher		Stahlguss Englischer	
	W. G. Armstrong & Co., Elswick	—	Schweden	Gebr. Böhler & Co., Wien	R. Jenkins	Fried. Krupp, Essen	Bergische Stahl-Industr., Remscheid	Edgar Allen & Co.[2])	Samuel Osborn & Co.[3])
5	12700	10900	12550	9500	12300	10750	8900	4700	9600
10	14980	13120	14300	12300	14920	13260	11400	12250	13050
15	15800	14010	15000	13600	15800	14250	12900	14000	14600
20	16300	14580	15400	14300	16280	14800	14000	15050	15310
30	16950	15280	16000	15300	16810	15560	15000	16200	16000
40	17350	15760	16450	15800	17190	16080	15600	16800	16510
50	—	16060	16650	16300	17500	16420	16100	17140	16900
60	—	16340	16900	16700	17750	16720	16500	17450	17180
70	—	16580	17200	17100	17970	16950	16800	17750	17400
80	—	16800	17400	17500	18180	17180	17100	18040	17620
90	—	17000	17550	17800	18390	17350	17400	18230	17830
100	—	17200	17700	18100	18600	17530	17700	18420	18030

1) Geschmiedeter Flussstahl.

2) Nach einem patentierten Verfahren des Herrn A. Tropenas hergestellt.

3) Nach dem Siemens-Prozess gegossen.

Jones[1]) entnommen, welche diese Proben in Stabform mit der du Boisschen magnetischen Wage untersucht haben. Die Werte der mit 2, 5, 8 und 9 bezeichneten Sorten entstammen einer Veröffentlichung von Herrn Ewing[2]), welcher die Proben in Ringform ballistisch geprüft hat. Die Untersuchung der Stahlgusssorte Nr. 6 ist sowohl von den Herren du Bois und Taylor Jones als auch von Herrn Ewing durchgeführt worden, und zwar von ersteren mit der magnetischen Wage, von letzterem ballistisch in Form eines Ringes. Da beide Beobachtungsreihen im Mittel nicht mehr als etwa 1 % voneinander abweichen, so sind in die Tabelle 3 die Mittelwerte beider Beobachtungen aufgenommen. In der Spalte 1 befinden sich die Werte für ein sehr schwer schmelzbares, fast reines Eisen, welches die Herren Lydall und Pocklington[3]) in Ringform ballistisch untersucht haben. Diese Zahlen sind von besonderem Interesse, da auch die chemische Zusammensetzung dieser Eisensorte angegeben ist. Es sind in diesem fast reinen Eisen nur folgende fremde Bestandteile enthalten:

Kohlenstoff . . . . Spuren,
Silicium . . . . „
Schwefel . . . . 0,013 %,
Phosphor . . . . 0 %,
Mangan . . . . 0,1 %.

Bei einem Vergleich der in der Tabelle 3 angeführten Zahlenwerte ergiebt sich, dass bei gleichen Feld-

---

1) H. du Bois und E. Taylor Jones, »Magnetisierung und Hysterese einiger Eisen- und Stahlsorten«, Elektrotech. Zeitschrift 17, p. 543—546, 1896.

2) Ewing, »The magnetic testing of iron and steel«, Proceedings of the Institution of Civil Engineers 126, 19. Mai 1896.

3) Lydall and Pocklington, »Magnetic Properties of Pure Iron«, Proceedings of the Royal Society of London 52, p. 228—233, 1892.

stärken das *reine Eisen* bei weitem die höchsten Werte der Induktion aufweist. Dies bestätigt die vielfach gemachte Erfahrung, dass die *Permeabilität* des Eisens unter sonst gleichen Bedingungen im allgemeinen desto höher ist, je weniger fremde Bestandteile das Eisen enthält. Ausserdem erkennt man aber auch, dass die Unterschiede zwischen den geschmiedeten und gegossenen Eisensorten nur gering sind, und dass sogar manche Sorten Schmiedeeisen, wie z. B. das Low Moor-Eisen, wenigstens bei Induktionswerten über 11000, an Güte den besseren Stahlgusssorten nachstehen.

Weitere Angaben, welche Herr Ewing in der bereits erwähnten Veröffentlichung über die Permeabilität bei den unterhalb der Feldstärke 5 liegenden magnetisierenden Kräften macht, lassen erkennen, dass Stahlgusssorten, welche zwar bei grösseren magnetisierenden Kräften in der Höhe der Induktion vom geschmiedeten Eisen übertroffen werden, doch bereits bei geringer Feldstärke ein oft höheres Maximum der Permeabilität erreichen als das geschmiedete Eisen. So zeigt Tabelle 4, welche die Permeabilitätswerte für das reine Eisen, den Jenkinsschen Schmiedestahl und den Kruppschen Stahlguss enthält, dass der Schmiedestahl,

Tabelle 4.

𝔅	1[1]) Reines Eisen		5 Engl. Schmiedestahl		6 Deutscher Stahlguss	
	𝔖	μ	𝔖	μ	𝔖	μ
2000	0,90	2220	1,38	1450	1,18	1690
4000	1,40	2850	1,91	2090	1,66	2410
6000	1,85	3240	2,38	2520	2,15	2790
8000	2,30	3480	2,92	2740	2,83	2830
10000	3,10	3220	3,62	2760	4,05	2470
12000	4,40	2760	4,80	2500	6,65	1810

1) Die Bezeichnung der Spalten entspricht derjenigen in Tabelle 3.

welcher bei höheren Induktionswerten nach Tabelle 3 den Kruppschen Stahlguss an Güte zum Teil erheblich übertrifft, erst bei einer Feldstärke von etwa 3,6 das Maximum der Permeabilität erreicht, während der Kruppsche Stahlguss bereits bei einer Feldstärke von etwa 2,8 ein um 2,5 % höheres Maximum aufweist. Das reine Eisen zeigt sich auch bei den geringen Feldstärken den beiden andern Sorten bei weitem überlegen, da es bereits bei einer Feldstärke von 2,3 ein Maximum der Permeabilität von etwa 3500 erreicht.

Wie bereits im § 31 auseinandergesetzt wurde, zeichnen sich die gegossenen Materialien durch besondere *Gleichmässigkeit* aus. Dies zeigt sich nicht nur, wenn man verschiedene Proben aus einem und demselben Gussstück untersucht, sondern selbst auch bei verschiedenen Gussstücken, welche nach demselben Verfahren hergestellt sind. So giebt Herr Ewing für vier verschiedene Stahlgussproben, welche nach demselben Verfahren wie der Stahlguss Nr. 8 in Tabelle 3 hergestellt waren, die Werte für die Kommutierungskurven, welche, wie Tabelle 5 zeigt, im Mittel nur um etwa 1 bis 2 % voneinander abweichen. Die Untersuchung dieser vier Proben hat Herr Ewing mit der von ihm konstruierten Permeabilitätsbrücke (s. § 29, 2, S. 71) vorgenommen. Die fünfte Spalte der Tabelle 5 enthält die aus der Tabelle 3 für den Stahlgussring Nr. 8 entnommenen Werte. Auch diese stimmen mit den

Tabelle 5.

$\mathfrak{H}$	$\mathfrak{B}$				
	1	2	3	4	5
20	15200	15200	15450	15500	15050
30	16000	16050	16200	16150	16200
40	16600	16450	16700	16600	16800
50	17000	16850	17100	17000	17140
60	17300	17200	17450	17300	17450
70	17600	17500	17700	17600	17750

übrigen gut überein. Einen weiteren Beweis für die Gleichmässigkeit der Stahlgusssorten liefert die bereits erwähnte Uebereinstimmung in den von verschiedenen Beobachtern erhaltenen Werten für den Kruppschen Stahlguss.

Für das zu *Transformatoren und Dynamoankern* verwendete Material giebt Tabelle 6, welche ebenfalls der Arbeit von Herrn Ewing entnommen ist, die Werte der Permeabilität für verschiedene Induktionen und gleichzeitig auch die zugehörigen Werte von $\mathfrak{H}$. Die Materialien sind sämtlich in Ringform ballistisch untersucht worden. Hierbei waren die Ringe 11, 12 und 13 durch Ausstanzen der Bleche in flacher Form hergestellt, während von der Blechsorte 10 ein Streifen zu einem Ringe von grossem Durchmesser aufgerollt wurde. Der Draht Nr. 14 war ebenfalls zu einem Ringe aufgerollt. Die Bleche waren sämtlich nach dem Auswalzen ausgeglüht worden. Die Ringe 10 und 14 wurden nach dem Aufrollen nochmals ausgeglüht.

Unter den angegebenen Zahlenwerten sind die hohen Werte der Permeabilität bei dem Ring Nr. 10 auffallend, zumal derselbe aus der gleichen Eisensorte wie Nr. 11 hergestellt war. Nun entstammten allerdings, wie Herr Ewing angiebt, 10 und 11 zwei zu verschiedener Zeit ausgeglühten Blechpaketen, so dass bei der bereits im § 31 erwähnten Ungleichmässigkeit von Transformatorblechen die Unterschiede zwischen den Werten der Spalten 10 und 11 wohl erklärlich wären. Hierzu kommt noch die verschiedene Herstellung der Ringe, wobei besonders das nochmalige Ausglühen des Ringes Nr. 10 sehr stark ins Gewicht fällt.

Die Versuche, welche man gemacht hat, um über die Abhängigkeit der Permeabilitätswerte und der Höhe der Magnetisierung von der *chemischen* Zusammensetzung Aufschluss zu erhalten, sind bisher nur von geringem

Tabelle 6.

𝔅	10		11		12		13		14	
	Schwedisches Transformator-Eisen				Transformatorblech aus Abfalleisen (besonders dünn)		Transformatorblech aus Flussstahl		Transformatordraht[1]) Durchmesser 0,602 mm	
	Dicke: 0,33 mm		Dicke: 0,301 mm							
	$\mathfrak{H}$	μ	$\mathfrak{H}$	μ	$\mathfrak{H}$	μ	$\mathfrak{H}$	μ	$\mathfrak{H}$	μ
1000	0,62	1610	0,81	1230	1,08	920	0,68	1470	1,71	590
2000	0,78	2560	1,05	1900	1,46	1370	0,90	2230	2,10	950
3000	0,90	3340	1,29	2320	1,77	1690	1,04	2880	2,30	1300
4000	1,03	3880	1,54	2600	2,10	1900	1,19	3360	2,50	1600
5000	1,18	4230	1,82	2750	2,53	1980	1,38	3620	2,70	1850
6000	1,36	4410	2,14	2800	3,04	1970	1,59	3770	2,92	2070
7000	1,57	4450	2,54	2760	3,62	1930	1,89	3700	3,16	2210
8000	1,85	4330	3,09	2590	4,37	1830	2,25	3600	3,43	2330
9000	2,20	4090	3,77	2390	5,3	1700	2,72	3310	3,77	2390
10000	2,64	3790	4,6	2170	6,5	1540	3,33	3000	4,17	2400
11000	—	—	5,7	1930	7,9	1390	4,15	2650	4,70	2340
12000	—	—	7,0	1710	9,8	1220	5,40	2220	5,45	2200
13000	—	—	8,5	1530	11,9	1190	7,1	1830	6,5	2000
14000	—	—	11,0	1270	15,0	930	10,0	1400	8,4	1670
15000	—	—	15,1	990	19,5	770	—	—	11,9	1260
16000	—	—	21,4	750	27,5	580	—	—	21,0	760

1) Nr. 14 ist dieselbe Drahtsorte, welche Swinburne für seine sogenannten »Igel«-Transformatoren (vergl. Elektrotechnische Zeitschrift 11, p. 515, 1890) verwendet hat.

Erfolge gekrönt gewesen. In neuerer Zeit hat vor allem Herr Parshall[1]) auf diesem Gebiete eingehende systematische Untersuchungen veröffentlicht. Die aus seinen Versuchsergebnissen gezogenen Schlüsse, welche für den Hütteningenieur von grossem Werte sind, sollen hier genauer angeführt werden.

Wie bereits bei der Besprechung der Tabelle 3 erwähnt wurde, ist es eine allgemein gemachte Erfahrung, dass die Abwesenheit fremder Bestandteile die Permeabilität des Eisens wesentlich erhöht. Daher ist auch vor allem das schwedische Eisen, welches nur sehr wenig fremde Beimengungen enthält, stets besonders bevorzugt worden. Bevor es den Hüttenwerken gelungen war, Stahlgusssorten mit geringem Gehalt an fremden Beimengungen herzustellen, wurde in erster Linie das an reinem Eisen reichste Schmiedeeisen zu Apparaten und Maschinen, bei welchen eine hohe magnetische Permeabilität verlangt wurde, benutzt. In Fig. 31 sind einige Kurven für Schmiedeeisen angegeben, und gleichzeitig sind in der Tabelle 7 die zugehörigen chemischen Analysen mitgeteilt. Wie man sieht, verläuft die Kurve *A*, welche dem bereits in Tabelle 3 angeführten reinen Eisen angehört, am höchsten. Die Kurve *B*, welche für ein schwedisches Eisen gewonnen ist, sollte

Tabelle 7.

	A %	B %	C %	D %
Eisen	99,887	99,805	99,694	99,402
Kohlenstoff	Spuren	0,027	0,058	0,035
Silicium	,,	Spuren	0,104	0,161
Schwefel	0,013	0,07	0,01	0,08
Phosphor	—	0,08	0,113	0,259
Mangan	0,1	Spuren	0,021	0,063
Graphit	—	0,018	—	—

1) Parshall, »Magnetic Data of Iron and Steel«, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 126, 19. Mai 1896.

nach dem Gehalt an reinem Eisen höher als die Kurve *C* verlaufen, was allerdings auch der Fall ist bis zu einer Induktion von etwa 13000. Der niedrige Verlauf bei der höheren Induktion ist möglicherweise dem

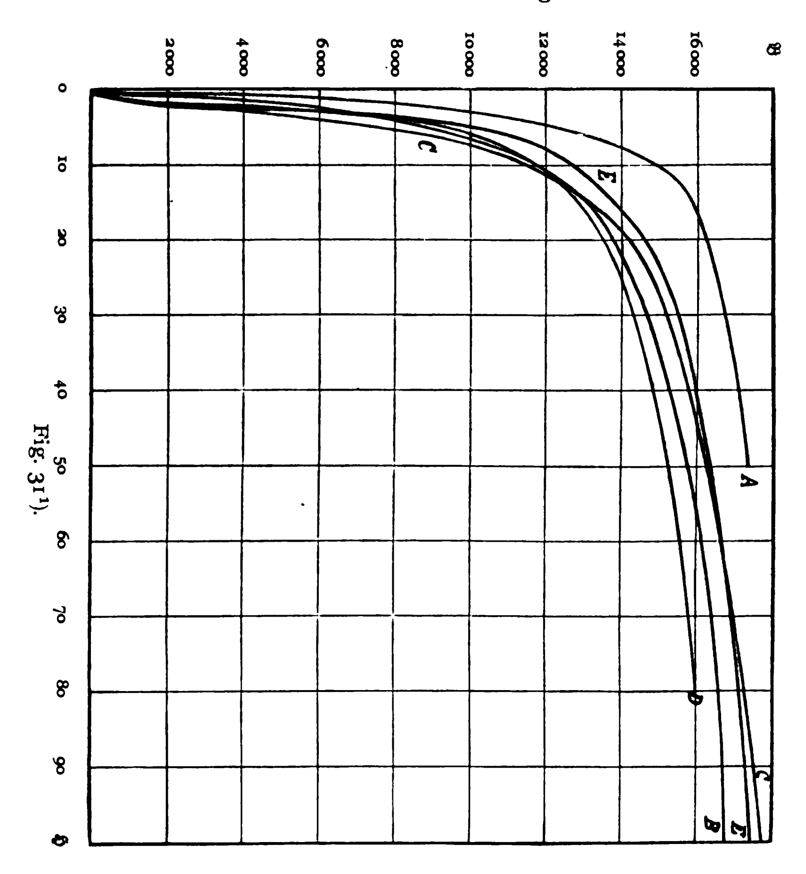


Fig. 31[1]).

Gehalt an *Graphit* zuzuschreiben, welcher diese Sorte auszeichnet, der indessen sonst meistens nicht in dem schwedischen Eisen vorhanden ist. Die Kurven *C* und *D*

1) Die Fig. 31 und 33 bis 35 sind der Deutlichkeit wegen in dem doppelten Massstab der Fig. 29 gezeichnet.

geben das magnetische Verhalten einer geringeren Sorte Schmiedeeisens wieder. Ihr niedriger Verlauf wird vor allem dem hohen Prozentgehalt an *Phosphor* zuzuschreiben sein. Die mit *E* bezeichnete Kurve stellt eine Mittelkurve dar, welche von Herrn Parshall aus den Bestimmungen an zehn Proben weichen Eisens erhalten ist. Die mittlere chemische Zusammensetzung dieses weichen Eisens ist nicht hinzugefügt.

In gleicher Weise wie das Schmiedeeisen sind auch die besseren Stahlgusssorten durch den geringen Betrag an fremden Bestandteilen gekennzeichnet. Derselbe beträgt oft nicht mehr als 0,3 %. Nach Parshall darf ein brauchbarer Stahlguss an fremden Stoffen höchstens enthalten:

Kohlenstoff	0,25 %,
Silicium	0,20 „
Schwefel	0,05 „
Phosphor	0,08 „
Mangan	0,50 „

Den wesentlichsten Einfluss auf die Permeabilität hat der *Kohlenstoff*, welcher im Stahlguss nur in gebundener Form und nicht als Graphit vorhanden ist. Zahlreiche magnetische Untersuchungen und gleichzeitige chemische Analysen haben gezeigt, dass die Abnahme der Permeabilität beim Stahlguss unter sonst gleichen Verhältnissen dem Gehalt an Kohlenstoff proportional ist, so dass man also bestrebt sein muss, den Kohlenstoffgehalt möglichst zu verringern. Den Einfluss des verschiedenen Kohlenstoffgehaltes zeigt Fig. 32. Die beiden Stahlgusssorten, für welche die Kurven *A* und *B* gewonnen sind, hatten die in Tabelle 8 angegebenen fremden Bestandteile.

Von den anderen Beimengungen ist *Silicium* in den meistenteils vorkommenden geringen Quantitäten weniger von schädlichem Einfluss als der Kohlenstoff. Ist es dagegen in bedeutender Menge in dem Stahlguss enthalten,

Tabelle 8.

	A	B
Kohlenstoff	0,170 %	0,984 %
Silicium	0,150 „	0,167 „
Schwefel	0,020 „	0,020 „
Phosphor	0,089 „	0,095 „
Mangan	0,390 „	0,318 „

so wird die Permeabilität erheblich herabgemindert, und das Eisen wird magnetisch härter. Den ungünstigsten

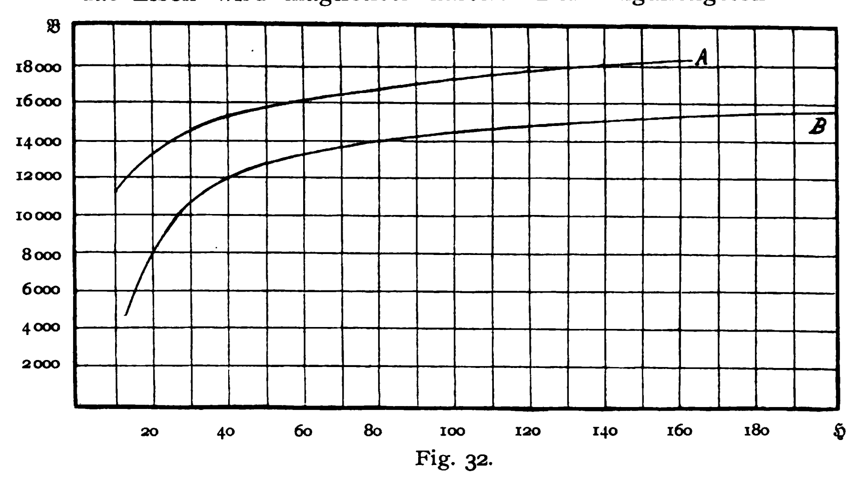


Fig. 32.

Einfluss hat Silicium, wenn es ungleichmässig verteilt ist, weil es dann die Bildung von Gussblasen erleichtert.

Mangan hat in Beträgen, welche unter 0,5 % liegen, nur geringe Wirkung auf die magnetischen Eigenschaften des Stahlgusses. Nach Angaben von Jackson[1]) darf dagegen der Prozentgehalt an Mangan nicht einmal mehr als 0,15 % betragen, da andernfalls bereits mit wachsendem Mangangehalt die Permeabilität abnimmt.

Schwefel und *Phosphor* sind in den gewöhnlich vorkommenden Mengen nicht schädlich, machen dagegen,

1) C. Jackson, Electrical World, 25, 1895.

wenn sie im Uebermass vorhanden sind, den Stahlguss ebenfalls magnetisch härter.

Um einen Ueberblick über die von Herrn Parshall untersuchten und gleichzeitig chemisch analysierten Stahlgussproben zu geben, seien hier zwei Tabellen angeführt, welche seiner Abhandlung entnommen sind. Tabelle 9 giebt für je vier Werte der Feldstärke die Grösse der Induktion bei zehn Stahlgussproben besserer Qualität und enthält zugleich die chemischen Analysen. In

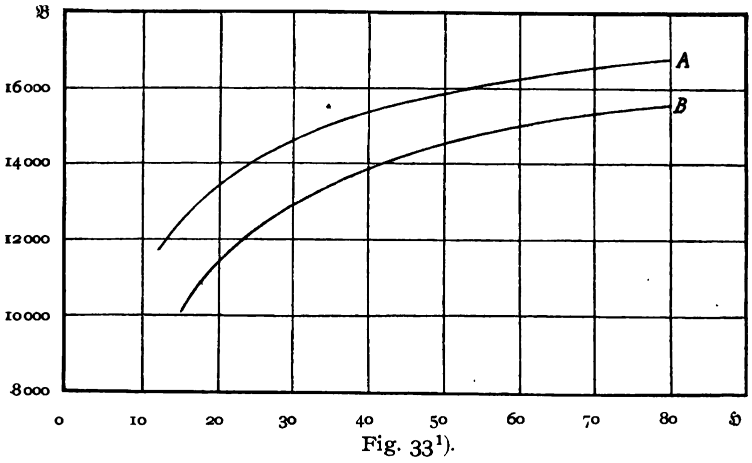


Fig. 33[1]).

Tabelle 10 sind dementsprechend die Werte für Stahlguss von geringerer Qualität eingetragen. In der letzten Spalte jeder Tabelle sind die Mittelwerte aus den zehn Proben angegeben. Diese sind dann zur Zeichnung von Kurven benutzt, welche in Fig. 33 dargestellt sind. Hierbei entspricht Kurve *A* den Mittelwerten aus Tabelle 9 und Kurve *B* denjenigen aus Tabelle 10.

Es sei an dieser Stelle noch auf den Einfluss zweier Elemente, und zwar des *Aluminiums* und des *Nickels* hingewiesen, welche beide die magnetischen Eigenschaften des Stahlgusses wesentlich verändern können.

1) Siehe Anmerkung 1, p. 96.

Tabelle 9[1].

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	Mittelwert
𝔅 für ℌ = 15	12200	12000	12090	12900	13000	12290	13100	12090	12600	13000	12500
𝔅 für ℌ = 25	14090	13590	13900	14400	14600	13890	14490	13700	14200	14490	14100
𝔅 für ℌ = 50	15790	15300	15590	15900	16600	15590	16090	15390	15790	16000	15800
𝔅 für ℌ = 75	16600	16200	16590	16490	17590	16400	17100	16290	16690	16600	16700
Kohlenstoff	0,240	0,267	0,294	0,180	0,290	0,250	0.200	0,230	0,170	0,180	0,230
Phosphor .	0,071	0,052	0,074	0,047	0,037	0,093	0,047	0,100	0,089	0,047	0,066
Silicium . .	0,200	0,236	0,202	0,120	0,036	0,230	0,170	0,160	0,150	0,120	0,162
Mangan . .	0,480	0,707	0,655	0,323	0,550	0,410	0,530	0,450	0,390	0,323	0,482
Schwefel . .	0,040	0,060	0,050	0,050	0,050	0,030	0,030	0,040	0,020	0,050	0,042
Eisen . . .	98,969	98,688	98,725	99,280	99,037	98,987	99,023	99,020	99,191	99,280	99,020

Tabelle 10.

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	Mittelwert
𝔅 für ℌ = 15	10600	10600	10700	8990	9300	10000	10400	10000	9300	11300	10100
𝔅 für ℌ = 25	12690	12690	13100	11190	11590	12090	12490	12400	11800	13500	12400
𝔅 für ℌ = 50	14900	14600	15100	13500	13900	14290	14400	14690	14090	15700	14500
𝔅 für ℌ = 75	15900	15590	15890	14400	14900	15300	15300	15690	15000	16490	15500
Kohlenstoff	0,250	0,280	0,195	0,333	0,337	0,366	0,409	0,318	0,702	0,380	0,357
Phosphor .	0,087	0,076	0,028	0,059	0,045	0,151	0,066	0,107	0,084	0,066	0,077
Silicium . .	0,210	0,210	0,683	0,292	0,302	0,476	0,444	0,203	0,409	0,550	0,378
Mangan . .	0,790	0,720	0,815	0,681	0,642	0,617	0,640	0,636[2]	0,088	0,790	0,642
Schwefel . .	0,020	0,030	0,040	0,060	0,070	0,040	0,010	0,030	0,050	0,030	0,038
Eisen . . .	98,643	98,684	98,239	98,575	98,604	98,350	98,434	98,706	98,663	98,184	98,508

1) Im englischen Original sind in sämtlichen Tabellen die Werte von 𝔅 in Induktionslinien für den Quadratzoll und ebenso die Werte von ℌ in Amperewindungen für einen Zoll angegeben. Diese Zahlen sind vom Verf. in C. G. S.-Einheiten umgerechnet worden.

2) Im Original steht 1,636, was offenbar ein Druckfehler ist.

Durch Zusatz von *Aluminium* wird der Stahlguss weicher und erlangt einen höheren Grad der Reinheit, so dass also auch die magnetischen Eigenschaften dadurch verbessert werden. Tabelle 11 giebt die Werte für zwölf Proben dieses *Aluminium-Stahls* oder des sogenannten *„Mitis-Eisens"*, welche von Herrn Parshall untersucht sind, unter gleichzeitiger Beifügung der chemischen Analysen. Die in der letzten Spalte angegebenen Mittelwerte sind zur Konstruktion einer Kurve

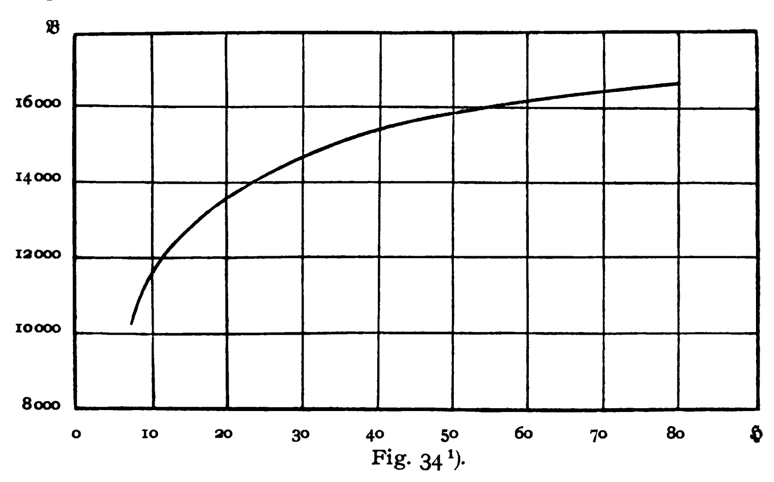


Fig. 34[1]).

benutzt worden, welche in Fig. 34 dargestellt ist. Aus einem Vergleich der Kurve und der Tabellenwerte mit den Werten der Stahlgussproben in Tabelle 9 ergiebt sich, dass das Mitis-Eisen unterhalb einer Induktion von etwa 16000 diesen Stahlguss noch übertrifft, was vor allem wohl dem um 0,3 % höheren Gehalt an reinem Eisen zuzuschreiben ist.

Besonders bemerkenswert sind die Eigenschaften, welche der Stahlguss durch Zusatz von *Nickel* erlangt. Eine Legierung von Stahlguss mit etwa 5 % Nickel

1) Siehe Anmerkung 1, p. 96.

Tabelle II.

	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Mittel wert
𝔅 für ℌ = 15	12600	14490	14490	12700	13900	14200	14000	10800	10000	12900	12700	11800	12900
𝔅 für ℌ = 25	13590	15590	15700	14490	14990	15700	15300	12650	11900	14290	14290	13390	14300
𝔅 für ℌ = 50	14800	16900	16690	16200	16430	16800	16490	14290	13900	15900	16000	14990	15800
𝔅 für ℌ = 75	15500	17600	17370	16900	16990	17390	17100	15200	14800	16800	16800	15700	16500
Kohlenstoff .	0,065	0,105	0,106	0,125	0,136	0,212	0,214	0,216	0,235	0,241	0,242	0,260	0,180
Phosphor. .	0,083	0,093	0,112	0,166	0,053	0,056	0,052	0,128	0,065	0,093	0,094	0,120	0,093
Silicium . .	0,073	0,045	0,050	0,046	0,111	0,126	0,111	0,083	0,122	0,072	0,099	0,020	0,080
Mangan . .	0,112	0,108	0,099	0,120	0,191	0,405	0,401	0,167	0,107	0,248	0,253	0,140	0,196
Schwefel . .	0,150	0,050	0,050	0,050	0,030	0,040	0,040	0,010	0,030	0,030	0,030	0,030	0,045
Aluminium .	0,079	nicht bestimmt	0,059	0,183	0,008	0,273	nicht bestimmt	0,152	0,055	0,120	0,119	0,080	0,113
Eisen [1]) . .	99,438	99,599	99,524	99,310	99,471	98,888	99,182	99,244	99,386	99,196	99,163	99,350	99,293

1) Die Zahlen für Eisen sind durch Subtraktion der Summen der anderen Zahlen von 100 erhalten.

erreicht höhere Werte der Permeabilität, als man es nach dem Gehalte an reinem Eisen erwarten könnte. Dies erkennt man aus der Kurve *A* in Fig. 35, welche für eine Legierung gewonnen ist, deren chemische Zusammensetzung folgende war:

Eisen	94,39 %,
Kohlenstoff	0,27 „
Silicium	0 %,
Schwefel	0,03 %,
Phosphor	0,04 „
Mangan	0,57 „
Nickel	4,7 „

Das Material übertrifft, wie man sieht, bei den höheren Werten der Induktion noch den Stahlguss in Tabelle 9 und erreicht bei der Feldstärke 50 das reine Eisen. Geringerer Nickelgehalt drückt die Magnetisierung herunter, wie dies die Kurve *B* zeigt, welche die Werte der Induktion für eine Legierung von folgender chemischer Zusammensetzung wiedergiebt:

Eisen	97,95 %,
Kohlenstoff	0,42 „
Silicium	0 %,
Schwefel	0,03 %,
Phosphor	0,04 „
Mangan	0,58 „
Nickel	0,97 „

Man erkennt aus der Figur, dass diese nur etwa 1 % Nickel enthaltende Legierung trotz des um $3^1/_2$ % höheren Gehaltes an reinem Eisen bei Induktionswerten über 10000 geringere Werte aufweist als die erste Legierung. Eingehende Untersuchungen über Nickeleisenlegierungen hat J. Hopkinson[1]) angestellt; auf

1) J. Hopkinson, »Magnetic properties of alloys of nickel and iron«. Proceedings of the Royal Society of London 47, p. 23, und 48, p. 1—14, 1890.

dieselben werden wir noch einmal im § 37 zurückkommen.

Für die magnetischen Eigenschaften eines Materials ist, wie schon erwähnt wurde, neben der chemischen Zusammensetzung auch die durch mechanische und

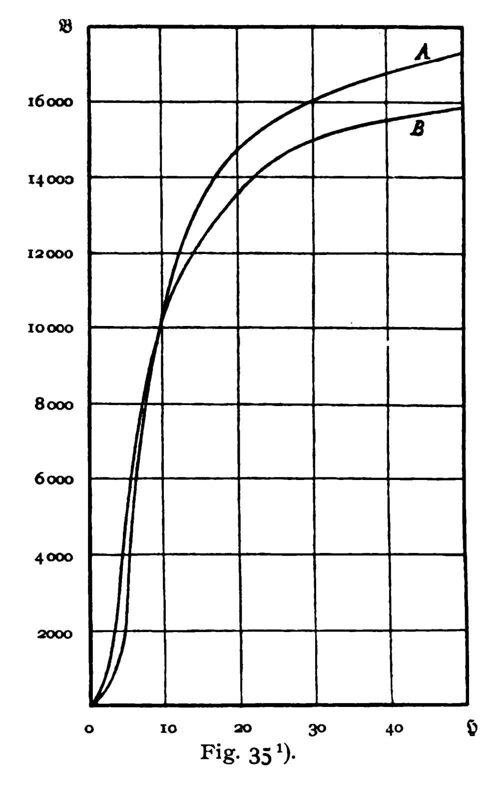


Fig. 35 [1]).

thermische Behandlung bedingte *physikalische Beschaffenheit* von besonderer Bedeutung. Es ist daher bei allen diesen Untersuchungen, durch welche der Einfluss der chemischen Zusammensetzung festgestellt werden soll, naturgemäss vorausgesetzt, dass die Proben

1) Siehe Anmerkung 1, p. 96.

Tabelle 12.

𝔅	μ	
	1.	2.
2000	2000	2500
3000	2730	3190
4000	3330	3810
5000	3700	4350
6000	4138	4800
7000	4375	5380
8000	4445	5440
9000	4615	5490
10000	4545	5460
12000	4000	4900
14000	2641	3260
15000	1415	2050

nach der Herstellung des Gusses in gleicher Weise behandelt worden sind. Wird dagegen z. B. von zwei Proben einer und derselben Eisensorte die eine ausgeglüht, die andere ungeglüht untersucht, so werden die beiden Proben, welche zwar die gleiche chemische Zusammensetzung haben, doch ganz verschiedene Werte der Permeabilität aufweisen. Dies zeigt z. B. Tabelle 12. In derselben sind die Werte der Permeabilität für einen Ring aus demselben reinen Eisen, welches bereits in Tabelle 3 angeführt ist, angegeben, und zwar unter 1 für den Ring im ungeglühten und unter 2 für denselben im geglühten Zustande[1]).

Versuche, welche in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt angestellt worden sind, haben gezeigt, dass durch mehrmaliges Ausglühen die Permeabilität eines Stahlgusses auf mehr als das Doppelte anwachsen kann. Da die Versuche noch nicht zum Abschluss gelangt sind, so können noch keine eingehenderen Angaben gemacht werden.

1) Die Werte sind einer Untersuchung von E. Wilson, »The magnetic Properties of almost pure Iron«, Proceedings of the Royal Society of London 62, p. 369—376, 1898, entnommen.

2. *Energievergeudung.*

Die Grösse der *Energievergeudung* ist vor allem bei denjenigen Materialien von Bedeutung, welche für Teile elektrischer Maschinen bestimmt sind, die wechselnden magnetischen Feldern ausgesetzt werden. Dies sind die *Anker der Dynamomaschinen* und die *Transformatorenkerne.*

Von besonderer Wichtigkeit ist es also, die Energievergeudung bei den zu diesen Zwecken verwendeten Blechen zu bestimmen. Da es indessen auch, vor allem des Vergleiches wegen, von Interesse ist, die Energievergeudung bei den zu Feldmagneten verwendeten Materialien kennen zu lernen, so sind in der Tabelle 13

Tabelle 13.

$\mathfrak{B}$	E	$\mathfrak{B}$	E
2000	550	10000	6280
3000	970	11000	7350
4000	1440	12000	8500
5000	2030	13000	9680
6000	2680	14000	11000
7000	3460	15000	12400
8000	4330	16000	13900
9000	5250	—	—

die von Herrn Ewing für den Stahlguss Nr. 8 (siehe Tabelle 3) bei verschiedenen maximalen Induktionswerten erhaltenen Werte der Energievergeudung E in Ergs pro Kubikcentimeter mitgeteilt. Diese Zahlen sind von Herrn Ewing in folgender Weise bestimmt worden. Es wurden zunächst für den Stahlgussring eine Anzahl cyklischer Magnetisierungsprozesse ausgeführt, von denen jeder einer anderen maximalen Induktion entsprach. Die aus den Beobachtungsdaten gewonnenen Kurvenschleifen, welche in Fig. 36 dargestellt sind, wurden ihrem Flächeninhalt nach ausgemessen. Da die Energievergeudung nach der Gleichung $E = \frac{1}{4\pi}\int \mathfrak{B}\, d\mathfrak{H}$ (s. § 14, Gleichung 11) dem Flächeninhalt der Hysteresisschleife proportional

ist, so erhielt Herr Ewing hieraus eine Anzahl Werte der Energievergeudung für verschiedene maximale Induktionen, welche bei ihrer Zusammenstellung eine Kurve

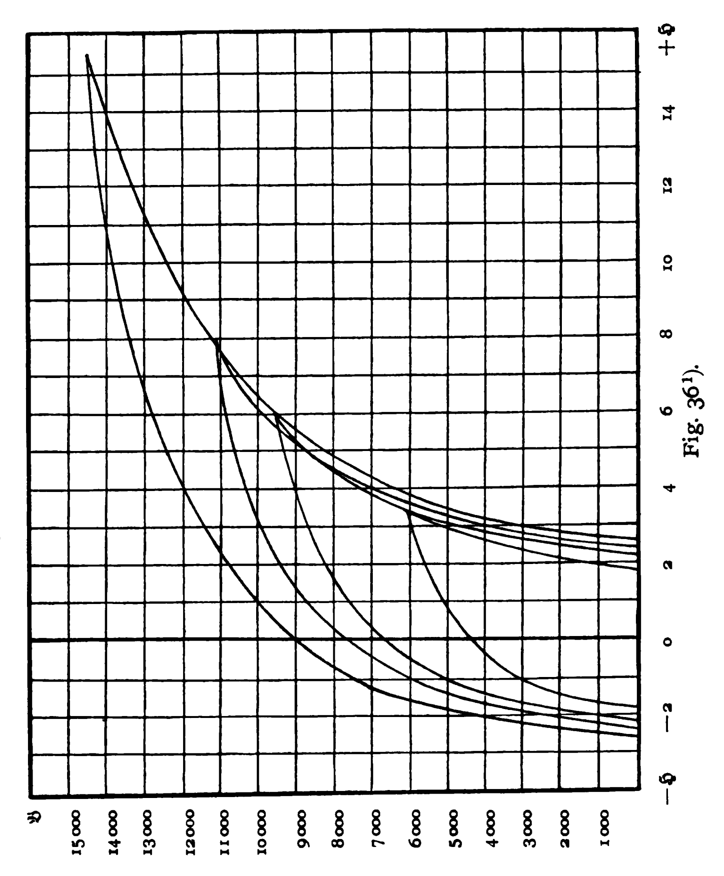


Fig. 36[1]).

ergaben, die in Fig. 37 wiedergegeben ist. Es sind hierbei in das Koordinatennetz in der Richtung der Abscissenachse die verschiedenen Werte der maximalen

---

1) Der grösseren Deutlichkeit wegen beträgt in der Fig. 36 der Abscissenmassstab das Zehnfache und der Ordinatenmassstab das Zweifache des in Fig. 29 benutzten Massstabes.

Induktion eingetragen, während in der Richtung der Ordinatenachse die Werte der Energievergeudung verzeichnet sind. Aus der Kurve ergeben sich dann die in der Tabelle 13 angegebenen Werte.

Die von Herrn Ewing mitgeteilten Zahlen entsprechen einem Stahlguss mittlerer Güte, da nach den Erfahrungen in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt die Werte der Energievergeudung für die

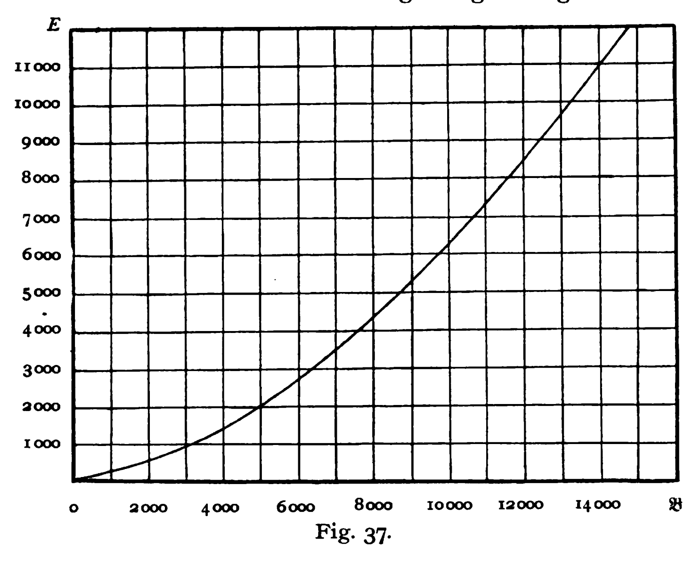


Fig. 37.

besseren Stahlgusssorten bei einer maximalen Induktion von 18000 etwa zwischen 10000 und 16000 Ergs pro Kubikcentimeter variieren, während die besten Sorten schwedischen Eisens eine Energievergeudung von nur etwa 6000 bis 8000 Ergs aufweisen. So haben z. B. auch die Herren du Bois und Taylor Jones die Energievergeudung bei dem Kruppschen Stahlguss (Nr. 6 der Tabelle 3) für eine maximale Induktion von 18000 zu 12500 und bei dem schwedischen Walzeisen (Nr. 3 der Tabelle 3) für eine Induktion von 17400 zu 6600 Ergs gefunden.

Während die Energievergeudung bei den zu Feldmagneten verwendeten Stahlgusssorten einen verhältnismässig hohen Betrag erreicht, da hierbei diese Grösse von geringer Bedeutung ist, hat man neuerdings die Transformatorbleche derart verbessert, dass sie in den Werten der Energievergeudung beinahe dem schwedischen Eisen gleichwertig sind. Tabelle 14 giebt die Werte der Energievergeudung für die in Tabelle 6 aufgeführten Bleche. Man sieht bei einem Vergleich der Tabellen 6 und 14, dass die Energievergeudung im allgemeinen desto geringer ist, je höher die Permeabilität des Materials ansteigt. Dies ist keineswegs immer der Fall, wie z. B. die Spalten 12 und 14 zeigen, so dass man nicht bei einem Material, welches eine hohe Permeabilität besitzt, auch unbedingt eine geringe Energievergeudung erwarten darf.

Tabelle 14.

$\mathfrak{B}$	*E*				
	10[1])	11	12	13	14
2000	220	240	400	215	600
3000	410	520	790	430	1150
4000	640	830	1220	700	1780
5000	910	1190	1710	1000	2640
6000	1200	1600	2260	1350	3360
7000	1520	2020	2940	1730	4300
8000	1900	2510	3710	2150	5300
9000	2310	3050	4560	2620	6380

Was nun den Einfluss der *chemischen Zusammensetzung* des weichen Eisens auf die Energievergeudung anbetrifft, so ist es hier ganz besonders schwierig, zu einem befriedigenden Resultat zu gelangen. Betrachtet man zunächst die von Herrn Parshall angegebene durchschnittliche chemische Zusammensetzung der hierfür

1) Die Bezeichnung der Spalten entspricht den Bezeichnungen in Tabelle 6.

Tabelle 15.

	Stahl[1]) Saurer Prozess %	Stahl[1]) Basischer Prozess %	Holzkohleneisen %
Eisen	99,38	99,41	99,73
Kohlenstoff	0,08	0,08	0,05
Silicium	0,01	0,01	0,05
Schwefel	0,05	0,05	0,03
Phosphor	0,08	0,05	0,08
Mangan	0,40	0,40	0,06

in Betracht kommenden Materialien, welche in Tabelle 15 zusammengestellt ist, so sieht man, dass die fremden Beimengungen nur in ausserordentlich kleinen Quantitäten vorhanden sind, dass also geringe Veränderungen dieser Mengen jedenfalls nur geringen Einfluss auf die Energievergeudung haben können. Es kommt noch hinzu, dass die Transformator- und Ankerbleche vor der Benutzung erst ausgeglüht werden müssen. Hierdurch aber tritt oft eine grössere Veränderung ein, als durch eine kleine Aenderung in der chemischen Zusammensetzung. Meistenteils ist es nämlich sehr schwierig, beim Ausglühen verschiedener Sorten derartig gleiche Verhältnisse zu schaffen, dass durch den Glühprozess

Tabelle 16[2]).

𝔅	E 1	E 2
2000	350	262
3000	500	460
4000	800	720
5000	1100	1010
6000	1450	1350
7000	1760	1670
8000	2160	2020
9000	2600	2450
10000	3100	2860

1) Statt Stahl ist besser Flusseisen zu setzen.

2) Der angeführten Abhandlung von E. Wilson entnommen.

selbst nicht Unterschiede in den Materialien hervorgerufen werden. Die Einwirkung des Ausglühens auf die Energievergeudung ersieht man aus Tabelle 16, in der die Energievergeudung für das reine Eisen (Nr. 1 in Tabelle 3), und zwar unter 1 im ungeglühten und unter 2 im geglühten Zustande angegeben ist.

Die Schlüsse, welche Herr Parshall aus seinen Untersuchungen über die Energievergeudung zieht, sind folgende: Von den fremden Bestandteilen ist *Silicium*, wenn es nicht im Uebermass vorhanden ist, nicht schädlich. Ebenso wenig verursachen *Mangan* und *Schwefel*, so lange sie nicht in grösseren Mengen als 0,5 %, bezw. 0,06 %, im Eisen enthalten sind, ein Anwachsen der Energievergeudung. Dagegen ist *Phosphor* schädlich und hat einen grösseren Einfluss als der *Kohlenstoff*. In Tabelle 17 und 18 sind einige Werte der Energievergeudung und gleichzeitig der chemischen Zusammensetzung enthalten, und zwar in Tabelle 17 für gutes und in Tabelle 18 für schlechtes Eisen.

Bei den Transformator- und Ankerblechen hat sich durch neuere Untersuchungen noch ein ganz besonderer Uebelstand herausgestellt. Es zeigte sich nämlich, dass die Bleche nicht dauernd dieselben Werte der Energievergeudung aufweisen, sondern sich im Laufe der Zeit durch die im Transformator oder Dynamoanker entwickelte Wärme verschlechtern. Herr Parshall giebt u. a. eine Tabelle, in welcher er die Verschlechterung des Eisens an einer Anzahl Proben zeigt. Die Werte sind in Tabelle 19 wiedergegeben. Aus derselben ersieht man, dass die ausgeglühten Materialien diese Verschlechterung zum Teil in stärkerem Grade zeigen als die nicht ausgeglühten. Auch hat sich ergeben, dass

1) Roget, »Effects of prolonged heating on the magnetic properties of iron«, Electrician 41, p. 182—184, 1898, und 42, p. 530—531, 1899.



Tabelle 17.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Mittelwert
Art des Materials	Weich. Eisen	—	—	—	—	—	—
Kohlenstoff . . .	0,076 %	0,085 %	0,072 %	0,086 %	0,095 %	0,078 %	0,082 %
Phosphor . . .	0,058 „	0,052 „	0,057 „	0,084 „	0,075 „	0,056 „	0,064 „
Silicium	Spuren	0,005 „	0,006 „	Spuren	0,007 „	0,012 „	0,005 „
Mangan	0,297 „	0,021 „	0,417 „	0,320 „	0,322 „	0,026 „	0,234 „
Schwefel	0,060 „	0,030 „	0,030 „	0,040 „	0,030 „	0,010 „	0,033 „
Energievergeudung in Ergs pro ccm für $\mathfrak{B} = 8000$[1].	2800	3100	2740	3000	3300	3400	3100

Tabelle 18.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	Mittelwert
Art des Materials	—	—	Weich. Eisen	Weich. Eisen	Weich. Stahl	Weich. Stahl	—
Kohlenstoff . . .	0,153 %	0,063 %	0,117 %	0,099 %	0,090 %	0,153 %	0,113 %
Phosphor . . .	0,032 „	0,075 „	0,101 „	0,135 „	0,101 „	0,031 „	0,079 „
Silicium	0,007 „	0,008 „	0,005 „	0,000 „	0,027 „	0,002 „	0,008 „
Mangan	0,430 „	0,036 „	0,401 „	0,449 „	0,449 „	0,486 „	0,375 „
Schwefel	0,050 „	0,030 „	0,010 „	0,030 „	0,030 „	0,070 „	0,037 „
Energievergeudung in Ergs pro ccm bei $\mathfrak{B} = 8000$.	6950	9010	8510	8060	8020	8020	8100

1) Im Original stehen Watts für 100 Cyklen und für 1 engl. Pfund. Vom Verfasser sind die Zahlen in C. G. S.-Einheiten umgerechnet.

Tabelle 19.

Energievergeudung in Ergs pro Kubikcentimeter bei $\mathfrak{B} = 8000$.

Ungeglüht	Geglüht	Nach 10 Tagen	Nach 30 Tagen	Nach 100 Tagen	Nach 180 Tagen	Vermehrung in %	Temperatur °C.
3900	—	3955	3955	3955	3955	1,4	25
3900	3300	3300	3300	3300	3300	0,0	25
4405	—	4455	4555	4705	4805	9,1	65
4675	3105	3205	3695	3300	3405	12,9	65
4350	—	4405	4505	4660	4760	9,2	85
4905	4205	4310	4505	4705	4810	14,3	85
4455	—	4455	4455	4505	4505	1,1	125
4800	3300	3505	3700	3855	3900	18,2	125
3805	—	3805	3815	3900	3900	2,6	25
3970	3205	3205	3205	3205	3205	0,0	25
3805	—	3805	3805	3900	3900	2,6	65
3405	2805	2805	2850	2900	2900	3,6	65
3900	—	3900	3900	3900	3900	0,0	25
3660	2905	2955	3005	3005	3005	3,4	25
3805	—	3805	3855	3900	3900	2,6	25
5015	3700	3700	3755	3755	3755	1,3	25
3900	—	3900	4055	4405	4605	18,0	65
3900	3105	3205	3405	3805	4005	29,0	65
4910	—	4955	5055	5405	—	—	65
4240	3300	3505	3660	3900	—	—	65
3755	—	3805	4055	4310	4350	15,0	85
3660	3105	3155	3300	3755	3755	18,0	85
3700	—	3755	3805	4045	4045	9,5	125
3660	2905	3055	3205	3505	3505	22,0	125

die besseren Blechsorten diesem Uebelstande stärker ausgesetzt sind. Die Verschlechterung kann jederzeit durch nochmaliges Ausglühen vollständig beseitigt werden.

In neuester Zeit hat Herr Roget[1]) dieselbe Frage eingehend behandelt und vor allem auch bei höheren Temperaturen zahlreiche Versuche hierüber angestellt. Seine Untersuchungen, bei welchen er die Energievergeudung für eine maximale Induktion von 4000 mittels

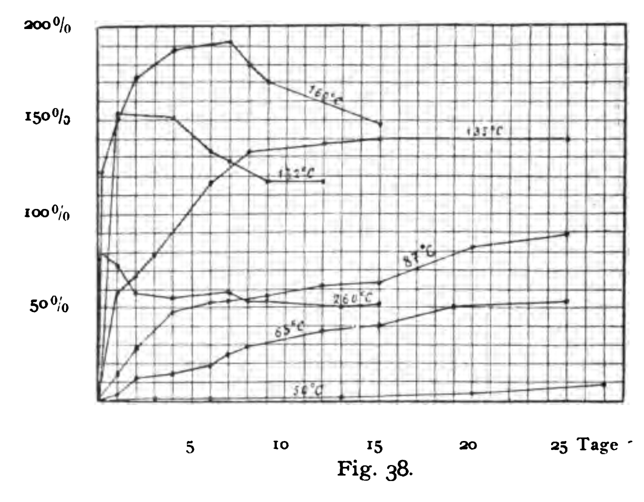


Fig. 38.

des Ewingschen Hysteresisprüfers (s. § 29, 3) bestimmte, haben ergeben, dass bei niedrigen Temperaturen, etwa bis 135° C., nur ein Anwachsen der Energievergeudung stattfindet, während bei höheren Temperaturen nach dem ersten Anwachsen wiederum eine Verminderung eintritt. In Fig. 38 sind die von Herrn Roget für Temperaturen bis 260° C. angegebenen Kurven der zeitlichen, durch Erwärmung hervorgerufenen Zunahme der Energievergeudung dargestellt. Herr Roget hat auch

---

1) Roget, »Effects of prolonged heating on the magnetic properties of iron«, Electrician 41, p. 182—184, 1898, und 42, p. 530—521, 1899.

mit einem Ring aus weichem Eisen, welchen er auf 200⁰ C. erhitzte, Versuche angestellt. Die Prüfung geschah in diesem Falle ballistisch. Er erhielt beim Beginn der Versuche bei der maximalen Induktion von 4000 eine Energievergeudung von 830 Ergs. Nach 19 Stunden ergaben sich 1580 Ergs und nach fünf Tagen 1420 Ergs. In gleicher Weise hatte sich auch die Permeabilität verändert.

Zum Schlusse dieses Paragraphen soll darauf hingewiesen werden, dass ausser der Energievergeudung durch magnetische Hysteresis bei den Transformatoren und Dynamoankern noch eine Energievergeudung durch Wirbelströme auftritt. Diese kann bei sehr schnell wechselnden Feldern unter Umständen ebenfalls beträchtlich werden. Dieselbe ist indessen nicht sowohl von dem magnetischen Verhalten des Bleches als hauptsächlich von der elektrischen Leitungsfähigkeit abhängig. Eingehender soll diese Art der Energievergeudung hier nicht behandelt werden, da bis jetzt keine genaueren Untersuchungen hierüber vorliegen.

§ 34. Gusseisen.

Während in früheren Jahren das *Gusseisen* beim Dynamomaschinenbau in erster Linie zur Verwendung kam, wird es in neuerer Zeit durch den mehr und mehr verbesserten Stahlguss zurückgedrängt. Eingehendere magnetische Untersuchungen über das Gusseisen sind ausser von Herrn Parshall[1]) noch von den Herren Hipple[2]) und Hewitt und von Herrn Summers[3]) angestellt worden. Die für Hütteningenieure wichtigsten Punkte dieser drei Arbeiten sollen hier genauer besprochen werden.

---

1) Parshall, »Magnetic Data of Iron and Steel«. Proceedings of the Institution of Civil Engineers 126, 19. Mai 1896.

2) Caldwell, Electr. World 33, Nr. 24, p. 619.

3) Bertrand S. Summers, »Theories and facts relating to cast iron and steel«. The Ironmonger 6. Mai 1899, p. 58—65.

Das Gusseisen, welches an fremden Bestandteilen erheblich reicher ist als das weiche Eisen, ist vor allem durch den hohen Gehalt an *Graphit* gekennzeichnet. Während der Gehalt an ***gebundenem Kohlenstoff*** nur 0,2 bis 0,8 % beträgt, wechselt der Betrag des gesamten Kohlenstoffs zwischen 3 und $4\frac{1}{2}$ %, so dass also ein ganz beträchtlicher Teil auf den Graphit entfällt. Der hohe Prozent-

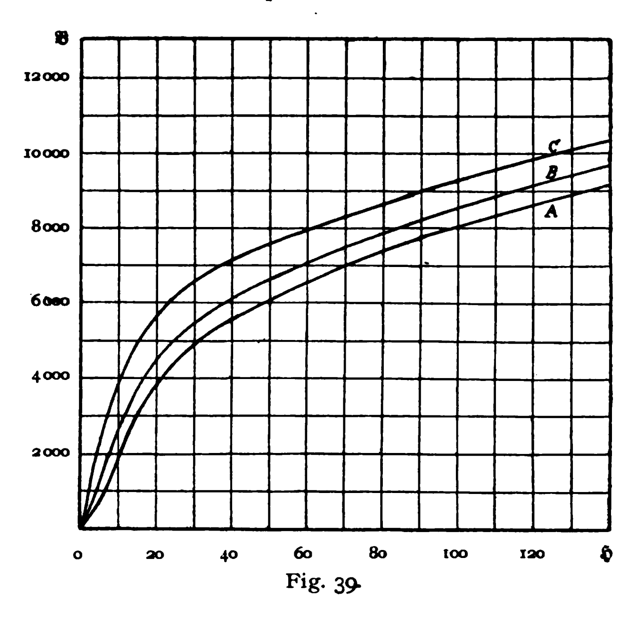


Fig. 39.

gehalt an fremden Beimengungen macht es beim Gusseisen besonders schwierig, den Einfluss der einzelnen Elemente auf die magnetischen Eigenschaften festzustellen.

Betrachtet man zunächst die Abhängigkeit des magnetischen Verhaltens des Gusseisens von dem wechselnden *Kohlenstoffgehalt,* so ergiebt sich nach den Untersuchungen von Parshall, dass der ***gebundene Kohlenstoff*** den grössten Einfluss ausübt. Gusseisen, welches weniger als 0,3 % gebundenen Kohlenstoff enthält, hat nach den Angaben von Parshall im all-

gemeinen eine verhältnismässig hohe Permeabilität. Den Einfluss des gebundenen Kohlenstoffs zeigt Parshall an drei Kurven, welche in Fig. 39 dargestellt sind. Der Gehalt an gebundenem Kohlenstoff beträgt bei dem Gusseisen der Kurve *A* 0,7 bis 0,8 %, bei dem der Kurve *B* 0,45 bis 0,65 % und bei dem der Kurve *C* 0,18 bis 0,21 %. Die Zunahme der Induktion mit abnehmendem Kohlenstoffgehalt ist deutlich erkennbar. Hierbei kann nach Parshall der Gehalt an *Graphit* zwischen 2 und 3 % variieren, ohne eine sehr bemerk-

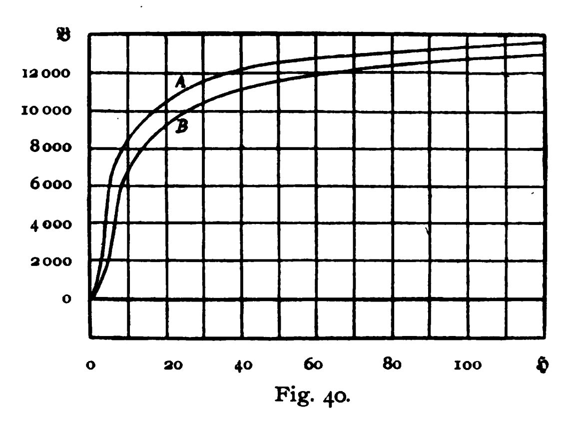


Fig. 40.

bare Wirkung auf die Permeabilität des Eisens auszuüben. Wenn indessen eine *Entkohlung* des Gusseisens stattfindet, und dasselbe hierdurch *schmiedbar* wird, so ist nach Parshall mit der Beseitigung eines Teils des Graphits, auch ein erhebliches Anwachsen der Permeabilität verbunden. Dies zeigen die in Fig. 40 dargestellten Kurven für schmiedbar gemachtes Gusseisen, dessen chemische Zusammensetzung in Tabelle 20 enthalten ist. Die Zunahme der Permeabilität schreibt Parshall in diesem Falle aber nicht der Abnahme des Graphitgehaltes, sondern der Aenderung der physikalischen Struktur zu, da nicht schmiedbar gemachtes

Tabelle 20.

	A.	B.
Gebundener Kohlenstoff	0,500	0,830
Graphit	2,119	2,201
Silicium	0,578	0,930
Schwefel	0,080	0,050
Phosphor	0,303	0,039
Mangan	0,164	0,116

Gusseisen, welches dieselbe Zusammensetzung hat, die Permeabilität ändert.

Nach der Ansicht von Summers wirkt hierbei noch ein anderer Umstand mit. Summers hat nämlich

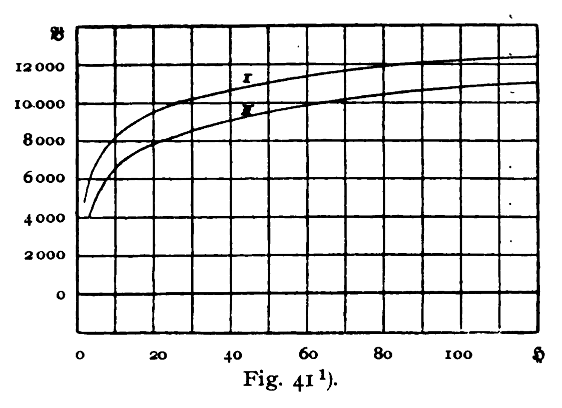


Fig. 41[1]).

zwei Proben eines sogenannten *„Halbstahls“*, eines Materials, welches in seinem magnetischen Verhalten zwischen Gusseisen und Stahlguss liegt, näher untersucht. Die Induktionskurven[2]) für diese beiden Proben,

1) Die Figur des Originals ist des besseren Vergleichs wegen auf denselben Massstab wie Fig. 40 verkleinert worden.

2) Es ist in der Arbeit von Summers keine Angabe darüber vorhanden, wie die Kurven gewonnen sind. Nimmt man an, dass die Werte — wenigstens bis zu einem gewissen Grade der Genauigkeit — absolute sind, so ergiebt sich bei einem Vergleich mit den Kurven von Parshall, dass der „Halbstahl“ Nr. 1 etwa dem schmiedbar gemachten Gusseisen *B* der Fig. 40 entspricht.

Tabelle 21.

	I. %	II. %
Gebundener Kohlenstoff .	0,03	0,06
Graphit	1,86	1,93
Silicium	3,56	3,83
Schwefel	0,074	0,070
Mangan	0,46	0,36

deren fremde Beimengungen Tabelle 21 enthält, sind in Fig. 41 dargestellt.

Aus der Tabelle ersieht man, dass der Prozentgehalt der fremden Beimengungen bei den beiden Proben fast gleich ist. Dennoch zeigen die beiden Induktionskurven einen sehr erheblichen Unterschied. Nach den Angaben von Summers waren beide Proben aus Gussstangen abgedreht, welche der gleichen Form entstammten. Die für den Guss benutzte Eisenmischung war möglichst die gleiche, nur die Stärke des Gebläsewindes beim Schmelzen im Kupolofen war in beiden Fällen verschieden. Während nämlich die Probe II in dem Kupolofen geschmolzen wurde, erhielt gleichzeitig ein zweiter Ofen von demselben Gebläse den Wind. Bei der Probe I dagegen, welche in demselben Kupolofen geschmolzen wurde, war die volle Kraft des Gebläsewindes für diesen einen Ofen benutzt worden. Bei der weiteren Untersuchung der beiden Proben ergab sich nun, dass die Probe Nr. II ein schwammiges Eisen war, das gusseisenartige Drehspäne gab, während das Eisen Nr. I dicht war, einen stahlartigen Glanz besass und beim Abdrehen lange stahlartige Drehspäne lieferte. Bei der mikroskopischen Untersuchung von Schnitten erschien das Eisen Nr. II innerhalb einer Art Skelett von abgesondertem Kohlenstoff vollständig von einem kohlenstoffartigen Staub bedeckt, welcher sich durch das ganze Eisen verteilt zeigte. Dieser Staub, welcher offenbar aus Graphit bestand, fehlte indessen gänzlich

bei dem Eisen Nr. I. Hier schien vielmehr das zwischen dem Kohlenstoffskelett eingebettete reine Metall dicht und homogen zu sein. Dieser Unterschied in der Struktur ist aller Wahrscheinlichkeit nach der Grund für die Festigkeit und hohe Permeabilität des Eisens Nr. I. Summers nimmt nun an, dass in dem Eisen Nr. I der Kohlenstoff nicht in Form von *Graphit,* sondern zum grössten Teil als *graphitische Temperkohle* vorhanden ist, und schreibt diesem Umstande den Unterschied der beiden Sorten in magnetischer Beziehung zu.

Vergleicht man die Ansichten von Parshall und Summers, so ergiebt sich bei näherer Betrachtung, dass beide nicht erheblich voneinander abweichen, da ja auch bei der Annahme der graphitischen Temperkohle deutlich eine Aenderung der physikalischen Struktur vorhanden ist. Im übrigen spricht auch Summers sich dahin aus, dass der Graphitgehalt beim Gusseisen auf das magnetische Verhalten nur wenig von Einfluss sei. Da nämlich beim Gusseisen ein hoher Graphitgehalt vorhanden ist, die Permeabilität aber im allgemeinen nur wenig variiert und sehr gering ist, so wird eine kleine Aenderung des Graphitgehaltes relativ auch nur wenig Einfluss haben, während beim Halbstahl, dessen Permeabilität höher ist und in weiteren Grenzen schwankt, eine Aenderung in der Menge oder der Form des Graphits mehr ins Gewicht fällt.

Da Herr Summers aus einer grossen Zahl von Gusseisenprüfungen vergeblich Schlüsse über den Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf die magnetischen Eigenschaften zu ziehen suchte, so stellte er sich, um möglichst systematisch die Untersuchung zu verfolgen, eine Anzahl Legierungen her, welche nur sehr geringe Mengen von Graphit enthielten. Hierbei verfuhr er folgendermassen. Er brachte Schmiedeeisenspäne und Ferrosilicium in einen Graphittiegel und

schmolz diese Mischung in einem gewöhnlichen Gelbgiessereiofen. Das Ferrosilicium hatte neben dem Eisen folgende Bestandteile:

Silicium	7,25 %,
Graphit	1,95 „
Gebundener Kohlenstoff . .	0,31 „
Schwefel	0,044 „
Phosphor	0,597 „
Mangan	0,88 „

Die entstandene Legierung enthielt nur Spuren von Graphit, während der gebundene Kohlenstoff gewöhnlich mehr als 2 % betrug. Durch Veränderung der Menge des zugesetzten Ferrosiliciums wurden Legierungen von verschiedener Zusammensetzung erhalten. Zwar bestand die ursprüngliche Absicht Summers darin, hierdurch nur den Siliciumgehalt zu ändern, doch änderte sich auch der Kohlenstoffgehalt infolge von Ungenauigkeiten in der Mischung und durch die Absorption von Kohlenstoff in dem Graphittiegel.

Aus den verschiedenen Legierungen wurden dann Probestäbe gegossen, welche abgedreht und magnetisch geprüft wurden, während die Drehspäne zur chemischen Analyse dienten. Die Induktionskurven[1]), welche Herr Summers mitteilt, sind für neun Legierungen in Fig. 42 dargestellt. Der in den Legierungen enthaltene Prozentsatz an fremden Bestandteilen ist in der Tabelle 22 angegeben.

Aus den Kurven lässt sich über den Einfluss des Kohlenstoffgehaltes nur wenig ersehen. Allerdings haben im allgemeinen die Legierungen mit dem

1) Im Original sind in den Kurven Amperewindungen angegeben. Vom Verfasser sind diese Werte in C. G. S.-Einheiten umgewandelt worden. Die den Kurven beigefügten Nummern entsprechen den Angaben in der Originalarbeit.

Tabelle 22.

	1	2	3	4	5	7	8	9	10
Gebundener Kohlenstoff . .	2,006	2,519	2,65	2,51	2,59	1,27	1,77	1,74	1,15
Graphitischer Kohlenstoff . .	0,006	Spuren	Spuren	Spuren	Spuren	Spuren	Spuren	Spuren	0
Silicium . . .	1,14	0,58	0.916	1 037	0.504	0,134	1,776	2.546	2,60
Schwefel	0,046	0,038	0,59	0,055	0,048	0,057	0,074	0,052	0,045
Phosphor . . .	0,412	0,269	0,723	0,794	1,049	0,664	0,886	1,139	1,154
Mangan	0,228	0,062	0,359	0,227	0,132	0,425	0,661	0,698	0,49

Fig. 42 [1]).

geringsten Kohlenstoffgehalt eine höhere Permeabilität, doch zeigt sich beim Vergleich einzelner Kurven, wie z. B. 1 und 2, auch das Gegenteil. Ob dies abweichende Verhalten etwa einem verschiedenen Zustande des Kohlenstoffs oder Verschiedenheiten in der physikalischen Struktur zuzuschieben ist, mag dahingestellt bleiben.

Herr Summers kommt zu dem Schluss, dass von den chemischen Beimengungen unzweifelhaft dem *Kohlenstoff* der grösste Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften sowohl des Gusseisens, als auch des von

1) Der Massstab ist doppelt so gross, als in Fig. 40 und 41.

ihm hergestellten Tiegeleisens zuzuschreiben sei. Hierbei scheint es ihm, dass der Teil des Kohlenstoffs, welchen man als *Härtungskohle* bezeichnet, in erster Linie beachtet werden muss. Dem verhältnismässig hohen Gehalt an Härtungskohle schreibt Summers es z. B. auch zu, dass das Gusseisen neben einer geringeren Permeabilität in höherem Grade als die von ihm hergestellten Tiegeleisensorten die Fähigkeit besitzt, den Magnetismus als permanenten festzuhalten. Wollte man in diesem Falle nur allgemein den Gehalt an gebundenem Kohlenstoff in Betracht ziehen, wie ihn Tabelle 23 angiebt, so müsste das Tiegeleisen mehr permanenten Magnetismus festzuhalten im stande sein, als das Gusseisen.

Tabelle 23

	Gusseisen %	Tiegeleisen %
Silicium	2,83	2,54
Schwefel	0,127	0,052
Phosphor	0,502	1,139
Mangan	0,370	0,698
Graphitischer Kohlenstoff	2,14	Spuren
Gebundener „	0,55	1,74

Ueber den Einfluss des *Siliciums* auf die magnetischen Eigenschaften des Gusseisens finden sich bei Herrn Parshall nur kurze Angaben. Das Silicium scheint hiernach bis zu einem Betrage von mehr als 2 % nicht schädlich zu sein. Es dient vor allem dazu, den Betrag an gebundenem Kohlenstoff zu verringern. Bei den Untersuchungen von Parshall schwankte die Menge des Siliciums zwischen 2,5 % bei kleinen und 1,8 % bei grossen Gussstücken. Auch Herr Summers gelangt bei seinen eingehenden Versuchen zu dem Schlussresultat, dass das Silicium innerhalb gewisser Grenzen wenig oder gar keinen direkten Einfluss auf

die Permeabilität des Gusseisens ausübt. So zeigen z. B. die Kurven 8 und 9 (Fig. 42) nur einen geringen Unterschied, während doch der Gehalt an Silicium bei Nr. 9 $^3/_4$ % mehr beträgt, als bei Nr. 8. Dagegen fand Summers, dass der Siliciumgehalt Einfluss auf die Hysteresis hat, und zwar derart, dass die Energievergeudung sehr gering war, wenn das Eisen viel Silicium enthielt. So hatte ein Anwachsen des Siliciumgehaltes auf über 3,75 % einen Einfluss auf die Hysteresis, aber nicht auf die Permeabilität.

Im Gegensatz zu diesen Angaben von Parshall und Summers suchen die Herren Hipple und Hewitt eine erhebliche Einwirkung des Siliciums auf die Permeabilität des Gusseisens nachzuweisen. Da indessen in ihrer Arbeit sich nur die Angaben über den Siliciumgehalt vorfinden und jede weitere Mitteilung über die anderen Beimengungen, vor allem auch über den Kohlenstoff, fehlt, so scheinen mir die von den Verfassern gezogenen Schlüsse durchaus unsicher zu sein. Ueber den Verlauf ihrer Versuche und das Ergebnis derselben seien daher nur einige kurze Angaben gemacht.

Es wurden von ihnen Gussstücke benutzt, welche einem kleinen Kupolofen entnommen waren. Der Siliciumgehalt wurde durch Zusatz von weissem Roheisen gesteigert. Die drei von ihnen untersuchten Eisensorten ergaben eine gute Uebereinstimmung der Kurven. Die mitgeteilten Versuchsergebnisse beziehen sich auf zwei Gussstücke, welche als „Rockwoodeisen Nr. 2" und „Bessemer" bezeichnet sind [1].

Die magnetische Untersuchung der Proben geschah nach der Doppeljochmethode von Ewing (siehe S. 51).

---

1) Das Bessemereisen wird aus einem Gemisch von Erzen vom Oberen See gewonnen und wird hauptsächlich zum Bessemerprozess benutzt. Das Rockwoodeisen stammt aus Tennessee und wird zum Grauguss verwendet.

Aus den Induktionskurven wurden die Werte der Feldstärke $\mathfrak{H}$ entnommen, für welche $\mathfrak{B} = 2000$, 5000, 7000 und 8000 war. Diese Werte wurden für die Proben von verschiedenem Siliciumgehalt in ein Diagramm eingezeichnet, so dass man eine Beziehung zwischen der Höhe des Siliciumgehaltes und der zum Erreichen einer bestimmten Induktion notwendigen Feldstärke erhielt. Aus den so gewonnenen Kurven ergab sich, dass die Permeabilität zunimmt, wenn der Siliciumgehalt von 1,8 auf 4,6 % steigt. Oberhalb 3,5 % scheint indessen bei höheren Induktionswerten eine Steigerung des Siliciumgehaltes bedeutend weniger Einfluss auszuüben.

Was den Einfluss des *Phosphors* anbetrifft, so stimmen Parshall und Summers darin überein, dass ein geringer Phosphorgehalt keine wesentliche Einwirkung auf die magnetischen Eigenschaften hat, dass dagegen bei zu grossem Phosphorgehalt das Material magnetisch minderwertiger wird. Parshall giebt den zulässigen Gehalt an Phosphor auf etwa 0,7 bis 0,8 % an, während Summers noch etwas mehr als 1 % gestattet. Summers änderte bei seinen Untersuchungen den Phosphorgehalt seines Tiegeleisens dadurch, dass er Schmiedeeisen, welchem er roten Phosphor zugesetzt hatte, der Mischung von Ferrosilicium und Schmiedeeisen zufügte.

Der *Schwefelgehalt* des Gusseisens ist gering. Nach Parshall ist Ueberschuss an Schwefel ein Kennzeichen einer zu grossen Menge gebundenen Kohlenstoffs und ist daher gleichzeitig auch ein Merkmal für geringe magnetische Qualität.

Von Summers wurden die Versuche über den Einfluss des Schwefels mit einem Halbstahl ausgeführt, welcher 40 bis 50 % Stahlschienenabfälle enthielt und einen Kohlenstoffgehalt von etwa 2 % besass. Der

grösste Teil hiervon befand sich im graphitischen Zustande. Summers kommt nun bei seinen Untersuchungen zu dem gleichen Schluss wie Parshall. Er stellt fest, dass 0,13 % die äusserste Grenze wäre, bis zu welcher der Schwefelgehalt ansteigen könne. Ein weiches Eisen mit Gehalt an graphitischem Kohlenstoff kann nach Summers ohne wesentliche Beeinträchtigung seiner Permeabilität 0,13 % Schwefel enthalten. Wenn dagegen bei diesen hochgekohlten Eisensorten der Schwefelgehalt zunimmt, so ist ein äusserst ungünstiger Einfluss bemerkbar. Nach der Ansicht von Summers ist die Einwirkung des Schwefels offenbar eine indirekte, indem derselbe den Kohlenstoff in die gebundene Form überführt. So war einer seiner Probestäbe aus Halbstahl, welcher 0,15 % Schwefel enthielt, so hart, dass er nicht abgedreht werden konnte, obgleich die anderen Beimengungen mit Ausnahme eines hohen Gehalts an gebundenem Kohlenstoff normal waren.

Mangan ist nach Parshall in den gewöhnlich vorkommenden Mengen von geringem Einfluss. Summers hat sich, um genauer die Einwirkung von Mangan auf die Permeabilität des Gusseisens zu untersuchen, zwei Probestäbe gegossen, indem er in einer Giesskelle Dynamogusseisen und Ferromangan, welches etwa 85 % Mangan enthielt, mischte. Bei der einen Probe setzte er etwa doppelt so viel Ferromangan zu, als bei der anderen. Die chemischen Beimengungen der beiden Proben sind in Tabelle 24 enthalten.

Tabelle 24.

	1	2
Gebundener Kohlenstoff	0,31	0,46
Graphitischer "	3,06	2,88
Silicium	2,61	2,29
Schwefel	0,077	0,082
Phosphor	0,535	0,537
Mangan	0,78	1,76

Es zeigte sich nun, dass die Probe 2, welche etwa 1 % mehr Mangan enthielt als Probe 1, eine niedrigere Permeabilität besass. Indessen hatte sich auch, wie die Tabelle zeigt, der Gehalt an gebundenem Kohlenstoff erheblich vermehrt. Hiernach scheint Mangan nur durch seine Wirkung auf den Kohlenstoff die magnetischen Eigenschaften zu beeinflussen. Während übrigens die Permeabilität durch Manganzusatz erniedrigt wird, nimmt nach Summers die Fähigkeit, den permanenten Magnetismus festzuhalten, erheblich zu.

Ueber den Einfluss des *physikalischen Zustandes* des Gusseisens auf seine magnetischen Eigenschaften sind weder bei Parshall noch bei Summers nähere Angaben gemacht; doch hebt Herr Summers den verbessernden Einfluss des Ausglühens bei einem kohlenstoffarmen Eisen hervor.

§ 35. Gehärteter Stahl.

Der zur Herstellung von *permanenten Magneten* verwendete *Stahl* unterscheidet sich, wie wir bereits im § 32 sahen, vor allem durch seine hohe Koërcitivkraft von den bisher besprochenen Materialien. Die Koërcitivkraft beträgt bei diesen Stahlsorten im ungehärteten Zustande etwa 20 bis 50 Einheiten, im gehärteten dagegen 60 bis 85. Da es für die Güte eines Dauermagneten erforderlich ist, dass er einerseits den Magnetismus nicht leicht verliert, anderseits auch möglichst hoch sich magnetisieren lässt, so ist das Bestreben darauf gerichtet, durch die Wahl der chemischen Zusammensetzung, vor allem durch gewisse Zusätze, die Koërcitivkraft möglichst zu erhöhen und gleichzeitig dahin zu wirken, dass ein recht hoher Prozentsatz des induzierten Magnetismus remanent erhalten bleibt. Indessen ist nicht allein die chemische Zusammensetzung hierbei von Bedeutung, vielmehr kommt auch die Form der Magnete und vor allem die Art der Härtung in Betracht.

Auf die Form und Dimension der Magnete[1]) hier einzugehen, würde zu weit führen, dagegen sei darauf hingewiesen, dass betreffs der Art der Härtung Herr Holborn[2]) eingehende Versuche angestellt hat, deren Resultat er in folgenden Sätzen zusammenfasst: „Der permanente und induzierte Magnetismus eines gehärteten Stahlstabes hängt von dessen *Härtungstemperatur* ab. Der Unterschied in den Magnetismen von Stäben, die bei verschieden hoher Temperatur gehärtet sind, nimmt unter sonst gleichen Umständen mit dem Kohlenstoffgehalt der betreffenden Stahlart zu. Die Magnete, welche bei einer solchen Temperatur gehärtet sind, dass sie das Maximum an permanentem Magnetismus annehmen, sind den bei höherer Temperatur gehärteten Magneten keineswegs unterlegen, was die Permanenz ihres Magnetismus gegenüber Erschütterungen und Temperaturänderungen anbetrifft. Da schon geringe Unterschiede in der Härtungstemperatur einen grossen Einfluss auf den permanenten Magnetismus ausüben, so ist bei der Anfertigung von kräftigen permanenten Magneten besonders die Härtungstemperatur richtig zu wählen. Der beste Magnetstahl liefert nur mässig starke Magnete, wenn er nicht bei der richtigen Temperatur gehärtet ist.“ Die Härtungstemperatur liegt bei den meisten Stahlsorten etwa zwischen 800 und 900° C.

Ausser der Härtung ist aber noch, wenigstens für die Dauerfähigkeit der Magnete, das sogenannte künstliche Altern von Wichtigkeit, bei welchem der gehärtete

1) Diese Frage ist von einem neuen Gesichtspunkte vor einiger Zeit von den Herren du Bois und Taylor Jones behandelt worden. Vergl. Elektrotechnische Zeitschrift 17, p. 543 bis 546, 1896.

2) L. Holborn, »Ueber das Härten von Stahlmagneten«, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 11, p. 113—124, 1891.

Magnet mehrfach längere Zeit erwärmt und ausserdem Erschütterungen ausgesetzt wird[1]).

Ueber die Zusammensetzung der einzelnen Stahlsorten und ihre Magnetisierung hat zuerst J. Hopkinson[2]) wertvolle Resultate veröffentlicht, die indessen neuerdings durch die von Frau Sklodowska Curie[3]) angestellten Versuche wesentlich vervollständigt sind. Die Ergebnisse dieser letzteren Untersuchungen seien in kurzem mitgeteilt.

Frau Curie findet, dass die Koërcitivkraft mit dem Prozentgehalt an Kohlenstoff nur wächst, bis etwa 1,2 % Kohlenstoff vorhanden ist, und für höhere Prozentgehalte wieder abnimmt. Die Energievergeudung durch Hysteresis wächst zunächst mit dem Prozentgehalt an Kohlenstoff und erreicht wahrscheinlich ein Maximum für einen über 1 liegenden Prozentgehalt. Der Zusatz von verschiedenen Metallen hat im allgemeinen auf den remanenten Magnetismus keinen Einfluss, drückt dagegen das Maximum der Magnetisierung herab, indem er zugleich die Koërcitivkraft und die Hysteresis vergrössert. Kleine Mengen von *Bor, Silicium, Mangan* scheinen keinen Einfluss zu haben, während *Nickel, Chrom* und *Kupfer* in geringen Zusätzen (weniger als 4 %) die für permanente Magnete wichtigen magnetischen Eigenschaften verbessern. *Wolfram-* und *Molybdänstahl* sind die besten Sorten. *Wolfram* und *Molybdän* wirken selbst bei sehr kohlenstoffreichen Stahlsorten (1,7 bis 2 %) ausserordentlich günstig. In der folgenden Tabelle 25 sind die

---

1) Hierüber haben eingehende Versuche angestellt Strouhal und Barus, Wied. Ann. 20, p. 662, 1883, und neuerdings Sklodowska Curie, L'éclair. électr. 15, p. 471—477 und 501—508, 1898; 16, p. 117—126 und 151—155, 1898.

2) J. Hopkinson, Phil. Trans. 1885, p. 463.

3) Curie l. c.

Tabelle 25.

Bezeichnung	Besondere Zusätze %	Kohlenstoffgehalt %	Härtungstemperatur ° C.	Koërcitivkraft	Remanente Intensität für Stäbe [1]	Remanente Intensität für geschlossenen Kreis [2]	Maximum der Intensität für $\mathfrak{H} = 500$	Energievergeudung	Besondere Bemerkungen
Böhlerscher Kohlenstoffstahl	—	0,70	800	49	420	—	—	—	weich.
	—	0,96	800	56	420	—	—	—	halbhart.
	—	0,99	800	55	410	—	—	—	extra zäh und hart.
	—	1,17	800	63	460	—	—	—	extra halb hart.
Kohlenstoffstahl von Unieux	—	0,75	770	51	410	—	—	—	—
	—	0,83	770	56	440	—	—	—	—
	—	0,96	770	58	430	640	1175	165000	—
	—	1,40	750	61	—	—	—	—	—
	—	1,61	750	46	—	—	—	—	—
Kupferstahl v. Châtillon und Commentry . .	$Cu = 3{,}9$	0,87	730	66	490	—	—	—	—
Wolframstahl von Assailly	$W = 2{,}7$	0,76	850	66	510	800	1240	260000	—
	$W = 2{,}7$	1,10	830	68	500	—	—	—	—
Wolframstahl von Châtillon und Commentry	$W = 2{,}7$	1,02	800	69	540	—	—	—	—
Steirischer Wolframstahl von Böhler .	$W = 2{,}9$	1,10	850	74	530	—	—	—	Spezialstahl, sehr hart.
	$W = 7{,}7$	1,96	—	45	350	—	—	—	Boreas, nicht gehärtet.
	$W = 7{,}7$	1,96	800	85	370	—	—	—	Boreas, gehärtet.
Stahl von Allevard . .	$W = 5{,}5$	0,59	770	72	560	850	1240	280000	—
Molybdänstahl von Châtillon und Commentry . . .	$Mo = 3{,}5$	0,51	850	60	530	—	—	—	—
	$Mo = 4{,}0$	1,24	800	85	530	—	—	—	—
	$Mo = 3{,}9$	1,72	800	78	560	—	—	—	—

1) Es ist die remanente Intensität in der Mitte von 20 cm langen Stäben von 1 qcm Querschnitt bestimmt.
2) Diese Zahlen geben die für einen geschlossenen magnetischen Kreis erhaltenen Werte.

wichtigsten Resultate der Beobachtungen von Frau Sklodowska Curie zusammengestellt.

In der im vorigen Paragraphen erwähnten Arbeit von Herrn Summers widmet derselbe auch einen Abschnitt den permanenten Magneten. Er kommt hierbei zu dem Schluss, dass *Mangan* ein sehr wichtiger Bestandteil für die permanenten Magnete sei, da es nach seinen Untersuchungen die Remanenz wesentlich erhöhe. Nun ist aber, wie wir bereits sahen, für die Güte der permanenten Magnete nicht sowohl der Umstand entscheidend, wie viel remanenter Magnetismus absolut vorhanden ist, sondern vielmehr, welcher Bruchteil der maximalen Magnetisierung remanent erhalten bleibt. Ausserdem kommt naturgemäss auch die Koërcitivkraft in Betracht. Ueber diese beiden Punkte macht aber Herr Summers keine Angaben. Auch ist aus seiner Arbeit nicht zu ersehen, ob die von ihm angegebenen Zahlen für den remanenten Magnetismus sich auf Magnete von gleichen Dimensionen beziehen. Die Zahlen sind daher nur von zweifelhaftem Wert, da bei Magneten von verschiedenen Dimensionen der variabeln Entmagnetisierungsfaktoren wegen keine Vergleiche gezogen werden könnten. Herr Summers hält nach seinen Erfahrungen einen Stahl für permanente Magnete brauchbar, wenn er folgende Beimengungen enthält.

Kohlenstoff	0,50 bis	0,56 %,
Mangan	0,70 „	0,80 „
Schwefel	nicht mehr als	0,05 „
Phosphor	„ „ „	0,10 „
Silicium	„ „ „	0,15 „

Es ist indessen anzunehmen, dass dieser Stahl bei weitem geringwertiger ist, als der von Frau Curie angeführte Wolfram- und Molybdänstahl.

§ 36. Nickel, Kobalt[1]).

Das *Nickel* und *Kobalt* ist, wie das Eisen, magnetisierbar. Die Höhe der bei einer bestimmten Feldstärke erreichten Induktion ist indessen bedeutend geringer als beim Eisen. Sie beträgt beim *Nickel* für eine Feldstärke von 100 Einheiten erst etwa 5000. Der Sättigungswert ist nur etwa $^1/_4$ bis $^1/_3$ des entsprechenden Wertes für Schmiedeeisen. Der grösste Wert der Permeabilität beträgt etwa 300 Einheiten. Rowland[2]) fand bei einem aus Nickel gegossenen Ring als Maximum der Permeabilität 222 und erreichte für $\mathfrak{H} =$ etwa 100 einen Induktionswert von etwa 5500 Einheiten.

Kobalt lässt sich stärker magnetisieren als *Nickel*. Unter Einwirkung eines starken Feldes wird dieses Metall etwa ebenso magnetisch wie Gusseisen. Ein von Herrn Ewing nach der Jochmethode untersuchter Kobaltstab, welcher 2 $^0/_0$ Eisen enthielt, erreichte das Maximum der Permeabilität bei etwa 25 Einheiten, und zwar war $\mu = 174$. Die Koërcitivkraft betrug bei diesem Stabe 12 Einheiten.

§ 37. Unmagnetische Legierungen.

Zum Schlusse seien noch einige Legierungen angeführt, welche sich durch ihre äusserst geringe Magnetisierbarkeit auszeichnen, obgleich sie stark magnetische Metalle enthalten.

Bereits im Jahre 1890 fand J. Hopkinson[3]) bei der ballistischen Untersuchung von Ringen aus *Nickeleisen* eine Legierung, welche bei gewöhnlicher Temperatur unmagnetisch war. Dieselbe enthielt 25 $^0/_0$ Nickel. Es

---

1) Vergl. J. A. Ewing, »Magnetische Induktion«, p. 86—87.

2) Phil. Mag., November 1874.

3) J. Hopkinson, »Magnetic properties of alloys of nickel and iron«, Proceedings of the Royal Society of London 47, p. 23 und 48, p. 1—14, 1890.

zeigte sich jedoch, dass dieselbe bei Abkühlung unter 0° C. magnetisierbar wurde. Sie behielt dann diese Eigenschaft beim Wiedererwärmen bei und verlor sie erst wieder, sobald sie auf 580° C. erhitzt wurde. Es giebt also für dieses Nickeleisen innerhalb der Temperaturgrenze von etwa 0° bis 600° C. zwei verschiedene magnetische Zustände. Die Permeabilität desselben beträgt im unmagnetischen Zustande nur 1,4. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die Fähigkeit, zwei verschiedene magnetische Zustände anzunehmen, in geringerem Grade auftritt, wenn der Gehalt an Nickel zunimmt. Nach Untersuchungen von Herrn Osmond[1]) ist eine Eisennickellegierung, welche 26,20 % Nickel, 0,61 % Kohlenstoff und 0,46 % Mangan enthält, bei Temperaturen über 0° C. stets unmagnetisch. Dieselbe wird nämlich erst magnetisierbar bei einer Temperatur, welche noch beträchtlich unter 0° C. liegt, während sie bei der Erwärmung ihre Magnetisierbarkeit bei 0° C. wieder verliert.

Versuche von Herrn Dumont[2]) haben gezeigt, dass für eine bestimmte Temperatur die Permeabilität der Legierungen zwischen 27 % und 44 % sich mit dem Gehalt an Nickel vermehrt.

Wie ein bestimmter Zusatz von *Nickel* den Stahl unmagnetisch macht, so geschieht dies auch durch stärkeren Zusatz von *Mangan*.

In § 33 und 34 sahen wir, dass Mangan in geringen Mengen keinen Einfluss auf die magnetischen Eigenschaften des Eisens ausübt. Setzt man dagegen etwa 12 % Mangan dem Stahl zu, so erhält man eine fast völlig unmagnetische Legierung, den Hadfieldschen

1) F. Osmond, »Sur les alliages de fer et de nickel«. Compt. rend. 128, p. 304—307, 1899.

2) E. Dumont, »Recherches sur les propriétés magnétiques des aciers au nickel«, Compt. rend. 126, p. 741, 1898.

Manganstahl[1]). Die chemische Zusammensetzung dieses Manganstahls ist etwa folgende:

Eisen	86,68 %,
Mangan	12,25 „
Kohlenstoff	0,80 „
Silicium	0,15 „
Phosphor	0,10 „
Schwefel	0,02 „

Bei dem Manganstahl ist die permanente Magnetisierung etwa 5000 mal kleiner als beim Stahl mittlerer Güte. Nach den Untersuchungen von Hopkinson ist bei der Feldstärke $\mathfrak{H} = 244$ $\mathfrak{B} = 310$ und $\mu = 1,27$.

Nach Ewing und Low ist die Permeabilität für Werte von $\mathfrak{H} = 1000$ bis $\mathfrak{H} = 5000$ nahezu konstant $= 1,45$[2]).

Setzt man dagegen mehr Mangan dem Eisen zu, so erhält man Legierungen, welche beinahe ebenso stark magnetisch sind wie Eisen[3]). In dieser Weise verhalten sich z. B. folgende beiden Legierungen:

Eisen	10,8 %,	14,8 %,
Mangan	54,46 %,	75,4 „
Aluminium	25,34 „	3,05 %,
Kohlenstoff	2,32 „	5,55 „

Nach Ostermann und Lacroix[4]) kann man reines *Nickel* oder dessen Legierungen dauernd unmagnetisch

---

1) Barrett, Proc. Roy. Dublin Soc. 15. Dezbr. 1887; Nat. 35, p. 311, 1887; Chem. News 55, p. 158 und 169, 1887.

2) Ewing und Low, Rep. Brit. Assoc., Manchester, p. 18; Lum. électr. 26, p. 188, 1887.

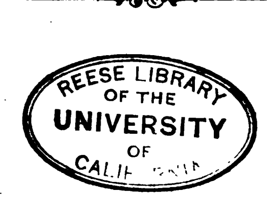
3) Vergl. Wiedemann, »Elektrizität«, II. Auflage, III. Bd., p. 616, 1895.

4) H. Ostermann und Ch. Lacroix, »Nichtmagnetische Chromnickellegierungen« (D. R. P. Nr. 48622), Zeitschr. f. angewandte Chemie 1889, p. 550.

machen durch Zusammenschmelzen mit *Chrom*. Eine in Ausdehnung, Elastizität und Bearbeitungsfähigkeit dem Stahl gleiche Legierung erhält man aus

80	Teilen	Nickel,
15	„	Chrom,
4	„	Platin,
0,6	„	Blei,
0,2	„	Zinn,
0,2	„	Zink.

Nickel beginnt seine magnetischen Eigenschaften bereits bei einem Gehalt von 3 % Chrom zu verlieren und ist bei 10 % vollkommen unmagnetisch.



Anhang[1].

			Seite
A	gleich	Skalenabstand	40
a	„	Skalenteile	40
$\mathfrak{B}$	„	Magnetische Induktion oder Induktionslinien pro Quadratcentimeter	8
b	„	Ballistische Galvanometerkonstante	40
E	„	Energievergeudung	21
η	„	Steinmetzscher Koëfficient der magnetischen Hysteresis	24
H	„	Horizontalintensität des Erdmagnetismus	7
$\mathfrak{H}$	„	Magnetische Feldstärke oder Intensität des magnetischen Feldes	7
$\mathfrak{J}$	„	Intensität der Magnetisierung oder specifischer Magnetismus	11
i	„	Elektrische Stromstärke	8
$\varkappa$	„	Susceptibilität oder Magnetisierungskoëfficient	17
L	„	Spulenlänge	8
l	„	Polabstand	6
M	„	Magnetisches Moment	6
m	„	Polstärke	6
m	„	Achsenverhältnis eines Ellipsoïds	12
μ	„	Permeabilität	17
N	„	Entmagnetisierungsfaktor	12
n	„	Windungszahl einer Spule	8
ν	„	Streuungskoëfficient	16

1) Es sind im Anhang die wichtigsten in dem Leitfaden gebrauchten Bezeichnungen noch einmal übersichtlich zusammengestellt. Die angeführte Seitenzahl bezieht sich auf diejenige Stelle, an welcher die Bezeichnung zum ersten Mal vorkommt. Alle Grössen sind in den absoluten Einheiten des elektromagnetischen C. G. S.-Systems auszudrücken. Die Beziehungen zwischen den wichtigsten praktischen Einheiten und den Einheiten des C. G. S.-Systems sind am Schlusse beigefügt.

			Seite
Φ	gleich	Induktionsfluss	9
φ	„	Ablenkungswinkel des ballistischen Galvanometers	39
Q	„	Elektrizitätsmenge	39
q	„	Querschnitt	9
v	„	Volumen	11
w	„	Elektrischer Leitungswiderstand	39

1 Ampere = 10^{-1} elektromagnetische C. G. S.-Einheiten.

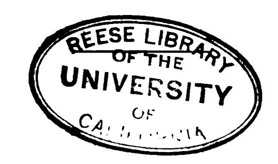
1 Ohm (international) = 10^9 elektromagnetische C. G. S.-Einheiten.

1 Volt = 10^8 elektromagnetische C. G. S.-Einheiten.

1 Kilowatt = 1000 Watt = 10^{10} Erg pro Sekunde und pro Kubikcentimeter.

Register[1]).

1) f. bezieht sich auf die nächstfolgenden Seiten, ff. auf den ganzen folgenden Abschnitt.


REESE LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY
OF

Druckfehler-Berichtigung.

Seite 40, Anm. 2, statt 10^9 Ohm (int.) lies: 10^{-9} Ohm (int.).


QD 591
S3
96244


Digitized by Google

